



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

NÁVRH KOMPLEXNÍHO SENZORU PRO LORA SÍŤ

DESIGN OF COMPLEX SENSOR NODE FOR LORA NETWORK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Obrtáč

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Chalupa

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Tomáš Obrtáč**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Jan Chalupa**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh komplexního senzoru pro LoRa síť

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V dnešní době je velmi moderní, když libovolná aplikace obsahuje konektivitu k internetu. Řada technických aplikací, které jsou umístěné mimo dosah obsluhy, vyžaduje určitý druh vzdálené kontroly či správy. Příkladem může být například kontrola hladiny provozních kapalin, kontrola teploty stroje, sledování překročení mezních stavů strojů apod.

Pro aplikace, kde nedochází k přenosům velkých objemů dat, může velmi dobře posloužit LoRa technologie. LoRa je nízko příkonová síť určená pro internet věcí (Internet of Things). Tato síť je charakteristická především svým velkým dosahem a nízkou spotřebou koncových bodů sítě.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše na téma síť LoRa a její aplikace, popište topologii a její různé konfigurace. Zjistěte v jakých režimech lze koncové moduly používat.
2. Rešerše ohledně softwarové podpory LoRa aplikací (internetová databáze či cloud služby).
3. Výběr čidel pro snímání environmentálních veličin.
4. Návrh a výroba elektroniky, která bude komunikovat s bezdrátovým modulem a čidly. Návrh proveďte s ohledem na optimální spotřebu, jelikož modul bude bateriově napájen.
5. Vytvořte firmware pro mikro kontrolér a také software pro PC, kde se budou jednotlivá data z senzoru zobrazovat.

Seznam doporučené literatury:

ZÁHLAVA, V. Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.

MIŠUREC, J., ZEMAN, V., ŠTĚPÁN, M. Konstrukce elektronických zařízení - návrh plošných spojů. Brno: 2003.

KREIDL, M. MĚŘENÍ TEPLoty - senzory a měřicí obvody. 1. vyd. Praha: BEN, 2005. 230 s. ISBN 80-7300-145-4.

LORA Alliance, [online], Dostupné z: <https://www.lora-alliance.org/>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá vývojom komplexného senzoru pre LoRa sieť. Práca je rozšírená o teoretickú časť, ktorá čitateľovi vysvetľuje a približuje základné vlastnosti LoRa siete. Teoretická časť sa zároveň venuje analýze softvérových a hardvérových produktov na trhu. Praktická časť je zameraná na výrobu komplexného senzoru a vývin kompletného softvéru pre jeho obsluhu. V hardvérovej časti je opísaný spôsob výberu senzorov, postup pri návrhu jednotlivých DPS a popis dôležitých súčiastok. Vývoj softvéru je spracovaný od zaobstarania Network Serveru, cez vývoj vlastnej aplikácie, až po tvorbu programu pre MCU.

Kľúčové slová

LoRa, LoRaWAN, Network Server, Application Server, BQ25570, RN2483, komplexný senzor, meranie environmetnálnych veličín, MCU

Abstract

This thesis covers development of complex sensor for LoRa network. The thesis is extended by theoretical section, which explains basic properties of Lora network. Theoretical section also covers analysis of software and hardware products on market. The practical part of thesis is focused on creation of complex sensor and development of complete server for its operation. In the hardware part is described method of choosing the right sensors, designing the PCB and description of important parts. Software development is described from acquisition of network server, through creating the computer application, to programming the MCU.

Keywords

LoRa, LoRaWAN, Network Server, Application Server, BQ25570, RN2483, complex sensor, measuring environmental parameters, MCU

Bibliografická citace mé práce:

OBRTÁČ, T. *Návrh komplexního senzoru pro LoRa síť*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 53 s, 11 příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Chalupa.

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu s názvom: „Návrh komplexního senzoru pro LORA síť“ vypracoval samostatne, na základe konzultácií, uvedenej literatúry a doposiaľ získaných teoretických a praktických poznatkov.

V Brne dňa

Tomáš Obrtáč

Rád by som týmto poďakoval vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Janovi Chalupovi za cenné rady a pozitívny prístup počas celého priebehu práce. Zároveň Ing. Petrovi Gotthardovi za veľkú pomoc pri sprevádzkovaní a údržbe Network Serveru. Nakoniec by som chcel poďakovať rodičom za neustálu podporu a pomoc počas celého štúdia.

Tomáš Obrtáč

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Rešerše	12
2.1	Definícia základných pojmov	12
2.1.1	LoRa.....	12
2.1.2	LoRaWAN	12
2.1.3	Internet of Things (IoT)	12
2.2	Architektúra siete	13
2.3	Komunikačný protokol.....	14
2.3.1	Frekvenčné pásma.....	14
2.3.2	Rýchlosť komunikácie	15
2.3.3	Citlivosť prijímača	16
2.3.4	Duty Cycle	16
2.3.5	Maximálna dĺžka správy	16
2.3.6	Metódy prihlásenia sa do siete.....	17
2.4	Typy zariadení.....	17
2.5	LoRaWAN sieť v Českej republike	18
2.6	Poskytovatelia softvérových riešení.....	19
2.7	LoRa Moduly	20
2.8	LoRa Gateway.....	20
2.9	LoRa v porovnaní s inými sieťami.....	21
3	Ciele praktickej časti práce	22
4	Výber senzorov pre snímanie environmentálnych veličín.....	23
4.1	Výber vhodných veličín	23
4.2	Senzory teploty.....	23
4.3	Senzory osvetlenia	24
4.4	Senzory tlaku.....	25
4.5	Senzory vlhkosti.....	25
4.6	Vyhodnotenie a testovanie senzorov	25
5	Tvorba hardvéru.....	27
5.1	Výber MCU.....	27
5.2	Výber energy harvesteru	27
5.3	Výber batérie	28
5.4	RN2483 modul	28
5.5	Testovací modul	29
5.6	Finálny modul	30
5.6.1	Ovládacia doska	31
5.6.2	Napájacia doska	32
5.6.3	Doska so senzormi intenzity svetla.....	33
6	Network Server	34

6.1	Lorawan-server.....	34
6.2	Použitie serveru pre účely bakalárskej práce.....	35
7	Aplikačný Server.....	36
7.1	Vývojové prostredie	36
7.2	Spôsob komunikácie s Network Serverom.....	36
7.2.1	REST API.....	36
7.2.2	Využívané REST API	37
7.3	Funkcionalita serveru	37
8	Softvér pre koncový modul	40
8.1	Spôsoby komunikácie.....	40
8.2	Protokol odosielaných správ.....	41
8.3	Kód pre MCU	42
9	Finálny produkt	45
9.1	Obal	45
10	Záver.....	46
11	Zdroje	47
	Zoznam skratiek	50
	Zoznam obrázkov.....	51
	Zoznam tabuliek.....	52
	Zoznam príloh	53

1 Úvod

V súčasnosti sa kladie čoraz väčší dôraz na zber a zhromažďovanie okolitých dát, hlavne za účelom zvyšovania energetickej efektívnosti a lepšej informovanosti. Možnosť ako dosiahnuť efektívny prenos dát je veľa a v mojej práci bude popísaná momentálne rýchlo sa rozvíjajúca technológia LoRa.

Cieľom rešeršovej časti tejto práce je priblížiť čitateľovi spôsob fungovania siete a objasniť základné pojmy využívané v tejto oblasti. Niekoľko odsekov je zároveň venovaných hardvérovej a softvérovej dostupnosti rôznych produktov, určených pre aplikáciu v LoRaWAN sieti.

Praktická časť sa zameriava na reálne využitie LoRa technológie v praxi. Za úlohu bolo potrebné vytvoriť batéριοvo napájaný bezdrôtový modul, s ohľadom na jeho nízku spotrebu. Pre zobrazovanie dát bol naprogramovaný Aplikačný Server, kde boli prijímané údaje vykresľované do priehľadného grafu.

Celkový produkt bol ešte doplnený o Energy Harvesting modul, umožňujúci získavanie energie zo solárnych článkov a Network Server vytvárajúci plnohodnotnú LoRaWAN sieť.

2 Rešerše

2.1 Definícia základných pojmov

2.1.1 LoRa

Slovo LoRa pochádza z anglického „Long Range“, čo v preklade znamená „Ďaleký dosah“. Túto technológiu vyvíja a poskytuje Americká firma Semtech, ktorá ju získala akvizíciou Francúzskej firmy Cycleo SAS v roku 2012. Ako čas ukázal, tento obchod bol veľmi výhodný, nakoľko práve táto technológia sa stala dominantou v oblasti IoT. Jej hlavné výhody spočívajú v ďalekom dosahu vysielania, nízkej energetickej spotrebe, ktorá podmieňuje nízku údržbu, udržateľnosti dlhej životnosti a jej vysokú odolnosť voči rušeniu.[3]



Obrázok 2-1: Logo technológie LoRa [5]

2.1.2 LoRaWAN

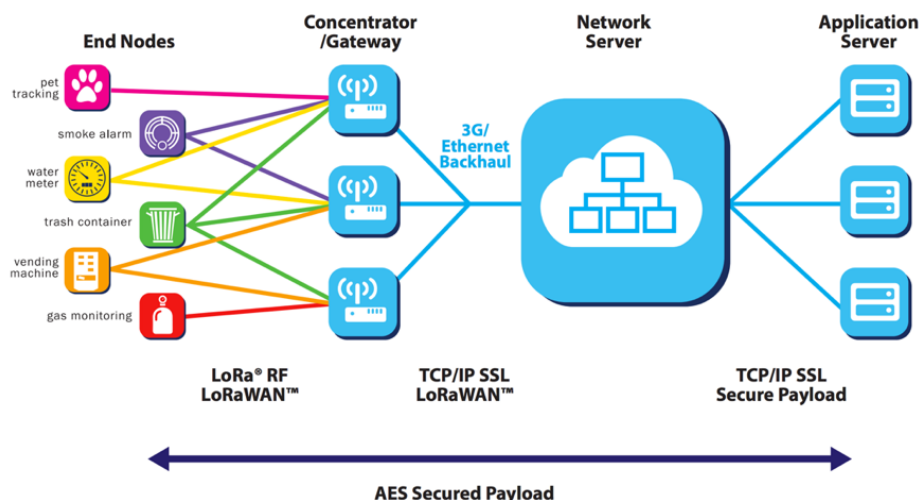
Tento názov vychádza z anglického „Low Power Wide Area Network“, teda v preklade „Nízko energetická rozsiahla sieť“. Táto sieť je primárne určená pre zariadenia, ktoré sú batériovo napájané, vyžadujú obojsmernú komunikáciu, mobilitu a bezpečnosť prenosu. Vďaka splneniu týchto vlastností sa výborne hodí na použitie v IoT. Dokážeme ju výborne využiť v aplikáciách ako inteligentné domácnosti, geografická lokácia alebo monitorovanie nekritických veličín. Jej výhodou je, že bez väčších obmedzení môže v sebe zahŕňať veľké množstvo zariadení. Za hlavné nevýhody je možné považovať obmedzený prenos dát a neschopnosť poskytovať Real-Time merania. Zároveň prenos prebieha vo voľnom pásme, čo môže spôsobovať problémy pri nedodržiavaní regulácie. [3]

2.1.3 Internet of Things (IoT)

Prepojenie zariadení a ich vzájomná interakcia bola pomenovaná ako Internet of Things. Jedná sa o spojenie a komunikáciu najmä medzi bezdrôtovými zariadeniami za účelom zjednodušenia komunikácie medzi systémami, úsporu energie a zvyšovaniu bezpečnosti. Tento pojem je skloňovaný a používaný hlavne v pojmoch ako „Inteligentné mesto“ a „Inteligentná doprava“. [7]

2.2 Architektúra siete

Dôležitým faktorom spoľahlivej a funkčnej siete je rozumné rozvrhnutie architektúry. Rozloženie siete LoRaWAN popisuje Obrázku. 2-2.



Obrázok 2-2: Architektúra LoRaWAN siete [6]

Za základný prvok sa považujú End Nodes tzn. koncové uzly. Dáta z End Nodes prostredníctvom LoRaWAN siete putujú do Gateway. Je potreba pripomenúť, že v oboch prípadoch sa jedná o hardverové zariadenia. Po tom, čo je správa prijatá, putuje pomocou TCP/IP protokolu na Network Server. Tentokrát sa jedná o softvérovú záležitosť. Ako posledná súčasť siete je Application server, ktorý už však nie je povinná súčasť topológie siete.[8,9,10]

End Node

Na začiatku celej siete stojí End Node. Od zariadenia sa vyžaduje, aby v určitých časových intervaloch alebo na cudzí podnet, spracovalo určité dáta a odoslalo ich prostredníctvom LoRaWAN siete do najbližšej Gateway. Identifikácia v sieti prebieha na základe jedinečných znakov, ktoré sú v End Node zadefinované ešte pred začatím komunikácie. Tejto problematike bude ešte venovaná osobitná kapitola. Povinnou súčasťou End Node je modul umožňujúci túto komunikáciu. Komunikácia prebieha na princípe FSK, viac info v [48]. Je dôležité podotknúť, že End Node nemusí byť prioritne určený iba pre zber a odosielanie dát, ale môže umožňovať aj ďalšiu funkcionality. Ako príklad je možné uviesť vysielanie informácií o polohe auta alebo reguláciu pouličného osvetlenia.[8,9,10]

Gateway

Ako ďalší prvok v topológii siete nasleduje Gateway. Je to zariadenie, ktoré tvorí prostredníka medzi End Node a Network Serverom. Po tom čo Gateway prijme správu, putuje prostredníctvom internetového pripojenia na Network Server, kde sa dáta ďalej spracúvajú. Je dôležité, aby pre Gateway bolo zabezpečené stabilné pripojenie k Network Serveru, najlepšie pomocou ethernetového káblu a TCP/IP protokolu. [8,9,10]

Počet End Node pripadajúcich na jednu Gateway nie je pevne zadefinovaný, avšak je potrebné myslieť na to, že ich zvyšujúci počet umocňuje riziko kolízie správ a teda nenávratnú stratu dát. [9]

Gateway sa v sieti identifikuje pomocou jedinečného 16 bajtového ID čísla, ktoré jej určí poskytovateľ siete. Zároveň je potrebné nastaviť IP adresu Gateway a IP adresu serveru, na ktorý sa má po fyzickom zapojení do siete pripojiť. Pre správnu komunikáciu je ešte potrebné zadať čísla portov, po ktorých prebieha komunikácia so serverom. Tieto čísla opäť určuje poskytovateľ serveru. [10]

Network Server

Azda najdôležitejšou súčasťou celej siete je Network Server, ktorý v sebe zahŕňa informácie o všetkých End Nodes a Gateways zaregistrovaných v sieti. Zároveň má za úlohu aj vyhodnotiť platnosť dát, teda či zariadenie, od ktorého Gateway prijala dáta je zaregistrované v sieti a v prípade ich platnosti má za úlohu ďalšie uskladnenie dát. Vytvorenie a údržbu servera zabezpečuje poskytovateľ siete. Server musí spĺňať špecifikácie LoRaWAN protokolu, ale ostatné vlastnosti sú už zodpovednosťou poskytovateľa a môžu byť ľubovoľne adaptovateľné na požiadavky klienta. [8,9,10]

Application Server

Poslednou časťou topológie siete je Application Server. Opäť sa jedná o softvérovú záležitosť a jej tvorba už býva väčšinou odkázaná na stranu zákazníka. Application Server komunikuje s Network Serverom prostredníctvom rôznych protokolov (REST API, Websocket, MQTT) a na základe prijatých dát už dokáže vykonávať zásah požadovaný klientom. Ako príklad môžeme uviesť reguláciu mestského osvetlenia. Ako už bolo poznamenané, Application Server nie je nevyhnutnou súčasťou LoRaWAN siete, ale je vyžadovaný v použití pri reálnych aplikáciách, kde sa vyžaduje automatický zásah na vonkajšiu zmenu. [8,9,10]

2.3 Komunikačný protokol

2.3.1 Frekvenčné pásma

Komunikácia prostredníctvom LoRa prebieha na celosvetovo dostupných nelicencovaných pásmach. Frekvenčné pásma sú špecifické pre rôzne geografické lokácie. V Tabuľke č. 2-1 sú uvedené niektoré z nich. [10,11]

Región	Frekvenčné pásmo
Európa	863 - 870 MHz
Severná Amerika	902 - 928 MHz
Čína	779-787 MHz

Tabuľka 2-1: Frekvenčné pásma [11]

2.3.2 Rýchlosť komunikácie

Maximálna rýchlosť, ktorú je možné dosiahnuť komerčne sa predávanými čipmi (SX1272 alebo SX1276), sa pohybuje na úrovni 38.4 kbps. Naopak, minimálna rýchlosť je na úrovni 0.18 kbps [11]. LoRaWAN avšak obmedzuje tieto rýchlosti a rýchlostné pásmo udáva na 0.3-22 kbps. Výsledná rýchlosť prenosu závisí od parametrov, ktoré je možné priamo nastaviť. Tieto pravidlá určuje protokol LoRaWAN specification [10] a sú rozdielne pre každý región. Pre región Európy a frekvenčné pásmo 863-870 MHz sú uvedené v Tabuľke č.2-2:

Data Rate	Konfigurácia	Bps
0	LoRa: SF12 / 125 kHz	250
1	LoRa: SF11 / 125 kHz	440
2	LoRa: SF10 / 125 kHz	980
3	LoRa: SF9 / 125 kHz	1760
4	LoRa: SF8 / 125 kHz	3125
5	LoRa: SF7 / 125 kHz	5470
6	LoRa: SF7 / 250 kHz	11000
7	FSK: 50 kbps	50000
8..15	Vyhradené	

Tabuľka 2-2: Špecifické nastavenia pre komunikáciu [10]

Data Rate (DR)

Faktor určujúci prenosovú rýchlosť je Data Rate. V prípade LoRa má hlavne informatívny charakter a určuje nastavenie ostatných parametrov. Zároveň LoRa umožňuje aj nastavenie ADR (Adaptive Data Rate), teda možnosť automatickej adaptácie DR na základe požiadaviek siete, čo môže priniesť úspory v spotrebe energie. Toto je výhodné hlavne pri požiadavkách na veľkú kapacitu siete, kde ADR algoritmus môže zväčšiť kapacitu siete 6 - 8 krát. Viac info v [10,11].

Spreading Factor (SF)

Tento parameter určuje citlivosť, respektíve minimálny pomer sily signálu ku sile šumu (SNR) na to, aby bolo možné prijatý signál ešte demodulovať. Avšak väčšia citlivosť nám negatívne ovplyvňuje rýchlosť odosielania. Viac info [10,11].

SF	SNR	Citlivosť
12	-20 dB	-134 dBm
10	-15 dB	-129 dBm

Tabuľka 2-3: Závislosť SNR a citlivosti na SF [10]

Bandwidth (BW)

Šírka odchýlky od frekvenčného pásma, po ktorom prebieha komunikácia počas vysielania, sa nazýva Bandwidth. LoRa ponúka na výber z troch rôznych rozsahov: 125,

250 a 500 kHz. So zvyšujúcou Bandwidth je umožnené preniesť viac informácií za kratší čas. Avšak má to za následok zhoršenie citlivosti a teda aj dosahu. [10,11]

Výpočet času prenosu

Potrebný čas na odoslanie jednej správy závisí od mnohých faktorov, ale najviac vypovedajúce sú parametre BW a SF. V zjednodušenej forme si vieme rovnicu pre dobu odosielenia odvodiť ako:

$$T_{packet} = \left((n_{preamble} + 4,25) + payloadSymbNb \right) T_{sym} \quad (1)$$

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2)$$

Výpočet ostatných parametrov je obširnejšie popísaný v [10]. Firma Semtech dokonca vytvorila softvér, kde je možné po zadaní vstupných parametrov vypočítať čas prenosu a jeho približnú energetickú náročnosť. [10,11,13]

2.3.3 Citlivosť prijímača

Výsledná citlivosť prijímača závisí od nastavenia vysielania. Najviac na ňu vplývajú nastavenia BW a SF. LoRa sa vyznačuje tým, že na rozdiel od ostatných FSK [48] modulácií dokáže prijímať aj signál, ktorý má SNR v záporných číslach, teda hodnota šumu presahuje hodnotu užitočného signálu. [10,11]

2.3.4 Duty Cycle

Maximálnu dobu, ktorú môžeme dáta prenášať nám určuje Duty Cycle (pracovná doba). Tento čas je definovaný ako 1 % času. Časovú jednotku z ktorej vychádzame definuje norma ETSI EN 300 220-1 [12] a je definovaná na časové obdobie 1 hodinu. Výsledný čas vysielania jedného End Node nesmie teda prekročiť 36 sekúnd za hodinu. [10,11]

2.3.5 Maximálna dĺžka správy

Maximálnu dĺžku správy špecifikuje LoRaWAN protokol a je definovaná rozdielne pre jednotlivé DR. Tieto hodnoty sú uvedené v Tabuľke číslo 2-4:

Data Rate	M	N	Data Rate	M	N
0	59	51	4	250	242
1	59	51	5	250	242
2	59	51	6	250	242
3	123	115	7	250	242

Tabuľka 2-4: Maximálna dĺžka správ [10]

- M - Maximálna dĺžka správ [bajt]
- N – Odporúčaná maximálna dĺžka správ [bajt]

2.3.6 Metódy prihlásenia sa do siete

LoRaWAN využíva dva spôsoby overovania platnosti End Node v sieti. Oba majú špecifické vlastnosti a svoje výhody a nevýhody.

Activation By Personalization (ABP)

Pre aktiváciu personalizáciou je špecifické, že na pripojenie do siete nie je potrebná potvrdzujúca odpoveď od serveru. Autorizácia zariadenia sa vyhodnocuje až po prijatí správy, kde sa podľa jedinečných znakov rozhodne, či je správa platná alebo nie. Pred začatím vysielania je do zariadenia potrebné ručne zadať nasledovné parametre:

- DevAddr (8 bajtov, určuje poskytovateľ siete)
- NwkSKey (16 bajtov, určuje poskytovateľ siete)
- AppSKey (16 bajtov, určuje poskytovateľ siete)

Na začiatok prenosu je avšak potreba zadať Join Request, ktorý má avšak iba informatívny charakter a nevyžaduje si potvrdenie od serveru.[10]

Over-the-Air Activation (OTAA)

Aktivácia OTAA sa dosť zásadne líši od ABP. Pred zahájením vysielania je potrebné manuálne zadať nasledujúce jedinečné hodnoty:

- AppEUI (8 bajtov, určuje poskytovateľ siete)
- DevEUI (8 bajtov, určuje poskytovateľ siete)
- AppKey (16 bajtov, určuje poskytovateľ siete)

Join Request pozostáva z AppEUI a DevEUI. Po jeho uskutočnení zariadenie čaká na odpoveď a v prípade pozitívnej odpovede je kombináciou prijatej správy a AppKey vytvorený NwkSKey a AppSKey, umožňujúci komunikáciu so serverom. Tento spôsob je jednoznačne bezpečnejší, no problém môže nastať už pri aktivácii, nakoľko antény môžu mať rozdielnu vysielaciu a prijímaciu silu, teda Gateway môže obdržať Join Request, ale nemusí byť schopná dodať odpoveď do End Node.[10,11]

2.4 Typy zariadení

LoRaWAN protokol rozdeľuje zariadenia do troch hlavných kategórií. Každá kategória má mierne rozdielny protokol a je vhodná pre iný typ aplikácie.

Class A

Za zariadenie typu A je možno považovať skoro každé zariadenie vysielajúce v LoRaWAN sieti. Jeho hlavný znak spočíva v tom, že perióda a čas prenosu sú ponechané čisto na End Node. Táto vymoženosť je výhodná hlavne v aplikáciách, kde je vyžadovaná nízka spotreba alebo okamžitá reakcia na podnet z okolia. Nakoľko sa jedná o obojsmernú komunikáciu, po odoslaní dát nastáva časový okamih, v ktorom zariadenie môže prijať dáta z Gateway. Tento časový okamih je stanovený v poslednom pakete dát.[10]

Class B

Zariadenia typu B sa využívajú hlavne tam, kde je potrebné nastaviť presný časový okamih a periódu, kedy majú byť dáta odoslané. Zariadenie sa dostáva do triedy B z triedy A. Na to, aby bolo možné používať v sieti zariadenia triedy B, je nutné aby Gateway vysielala v určenom časovom úseku tzv. „beacon“ (svetelný signál) s informáciou o aktuálnom čase, ktorý je potrebný pre zosynchronizovanie End Node so serverom. Odosielanie správ serveru už vypadá podobne ako v triede A. V praxi zariadenia typu B nie sú veľmi často používané, nakoľko prinášajú značnú komplikáciu do siete a nepodporuje ho ani väčšina Network Serverov. [10]

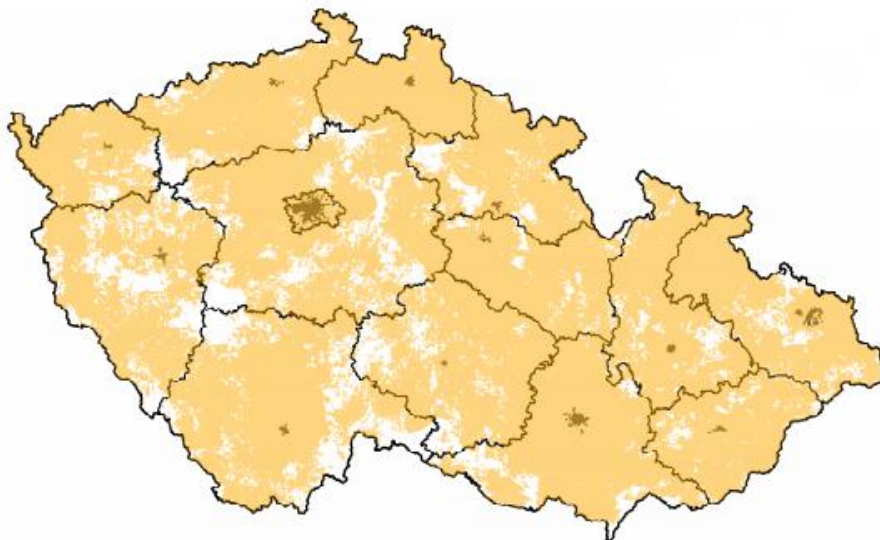
Class C

Táto trieda sa používa v aplikáciách, pri ktorých nie je potrebné brať ohľad na energetickú nenáročnosť. Zariadenie pracuje v móde kontinuálneho prijímača až na okamžiky, keď odosiela správu. [10]

2.5 LoRaWAN sieť v Českej republike

České Radiokomunikace

Najväčším poskytovateľom LoRaWAN služieb v Českej republike sú České Radiokomunikace, ktoré pokrývajú väčšinu územia. Sieť je v prevádzke od roku 2015 a momentálne je nainštalovaná vo všetkých krajských mestách a postupne prebieha jej implementácia aj do okresných miest. [14,15]



Obrázok 2-3: Predpokladaný rozsah pokrytia pre polovicu roku 2017 [15]

České Radiokomunikace ponúkajú kompletnú podporu hardvérových aj softvérových služieb pre plnohodnotné využívanie siete. Zároveň ponúkajú aj skúšobnú registráciu senzorov, čo môže pomôcť začínajúcim developerom a značne rozšíriť IoT komunitu. Cena za jeden senzor sa pohybuje v rozmedzí 10-30 kč. mesačne, v závislosti na početnosti komunikácie a množstve využívajúcich kanálov. [14,15]

The Things Network

V tomto prípade sa jedná o otvorenú komunitu nadšencov a ľudí podporujúcich IoT. Môžeme ju nájsť pod webovou adresou <https://www.thethingsnetwork.org>. Pod týmto menom je celosvetovo postupne budovaná IoT sieť založená na báze dobrovoľnosti. V Českej republike majú zastúpenie v Prahe, kde majú zapojené už tri Gateway. Zaregistrovanie senzoru v tejto sieti nič nestojí, avšak sú tam isté obmedzenia, hlavne čo sa týka množstva prenesených dát a početnosti prenosu. Užívateľ má takisto možnosť prispieť do tejto siete vlastnou Gateway a rozšíriť túto komunitu.[16]

2.6 Poskytovatelia softvérových riešení

V prípade potreby vytvorenia vlastnej LoRaWAN siete je ponechaný výber jednotlivých častí siete na jej tvorcovi. Ten môže ísť cestou vytvorenia vlastných jednotlivých častí, alebo siahnuť po hotovom riešení od externého dodávateľa.

LORIoT

Táto firma so sídlom v Švajčiarsku sa zameriava na kompletnú softvérovú podporu LoRaWAN produktov. Ponúka kompletné riešenia pre Network aj pre Application Server. V jej portfóliu je možné nájsť aj skúšobné (bezplatné) a zároveň aj profesionálne (pre komerčné využitie) riešenia. Ku svojim plateným produktom poskytuje aj nepretržitú podporu. Ich Networks Servery podporujú súčasné pripojenie viac ako 10 Gateway a sú navrhované aby bezproblémovo zvládli obhospodáriť sieť s viac ako 1000 zariadeniami. Aplikačné Servery podporujú väčšinu momentálne najpoužívanějších databáz a umožňujú aj prispôbenie grafického rozhrania. [17]

Simfony

Trochu odlišný prístup ponúka firma Simfony. Eliminuje starosť zákazníka s obstarávaním vlastného Network Serveru, pričom ponúka svoj vlastný, na ktorý napojí zákazník svoju Gateway. Simfony zároveň ponúka hotové koncové aplikácie, prípadne pomoc pri ich zostavovaní. Výsledná cena sa pohybuje v závislosti počtu zapojených zariadení. [18]

RestIO

V tomto prípade firma ponúka Network Server a ostatné vybavenie siete už ostáva na zákazníkovi. Server tejto firmy podporuje zatiaľ iba zariadenia triedy A. Zároveň podporuje prihlásenie pomocou ABP aj OTAA. [19]

Ako ďalších poskytovateľov LoRaWAN služieb je možné spomenúť firmy ako Proximus EnCo alebo Thing Connected.

2.7 LoRa Moduly

Medzi LoRa modulmi si zákazník na trhu môže vyberať z produktov viacerých poskytovateľov. Výrobky sa medzi sebou líšia cenou, dosahom, veľkosťou, komunikačným protokolom a možnosťami, ktoré ponúkajú. Je dobré spomenúť, že všetky moduly v sebe obsahujú vysielateľ od firmy Semtech (SX1272 alebo SX1276). Medzi najväčších producentov patrí Microchip, MultiTech, a Embit. V Tabuľke č. 2-5 sú porovnané niektoré z modulov.

Názov	EMB-LR1272	FMLR series	RN 2483/2903	iM881A-M
Výrobca	Embit	Miromico	Microchip	IMST, GmbH
Frekvencia	868/915 MHz	868/915 MHz	868/915 MHz	868 MHz
Max. vysielacia sila	14/19 dBm	20 dBm	14/18,5 dBm	14 dBm
Max. Citlivosť	-137 dBm	-143 dBm	-147 dBm	-137 dBm
Napätie	1,8 – 3,6 V	-	2,1 – 3,6 V	2,4 – 3,6 V
Spotreba Sleep mode	1 – 3 μ A	10 – 150 μ A	< 2 μ A	1,4 μ A
Spotreba pri odosielaní	34/125 mA	-	40/140 mA	38 mA
Rozmery	29 x 22 mm	14x22 mm	18,7 x 26,7 mm	20 x 25 mm
Maximálny dosah	15 km	15 km	15 km	15 km
Periférie	UART/I2C/SPI/ADC/SWD	USB/UART/SPI/I2C	UART/SPI/GPIO	UART/SPI/I2C
Cena	22,5 €	15-32 €	11,5 - 14,5 €	11,8 - 13,29 €

Tabuľka 2-5: Špecifikácie a porovnanie LoRa modulov [20,21,22,23]

2.8 LoRa Gateway

V tomto sektore je zákazník obmedzený trochu viac ako pri výbere LoRa modulov. Nakoľko Gateway má v sebe implementovanú jednotku SX1301 od Semtechu, ktorá nie je voľne predajná, môžu tieto zariadenia vyhotovovať iba jeho

Názov	Wirnet Station 868	Conduit	LR 2	RHF2S008
Výrobca	Kerlink	Multitech	LORRIER	RISINGHF
Frekvencia	868 MHz	868 MHz	863 – 870 Mhz	868 MHz
Max. vysielacia sila	28 dBm	27 dBm	20 dBm	-
Citlivosť	-141 dBm	-	-137 dBm	-
Možnosti pripojenia	GPRS/3G/RJ45	4G/3G/RJ45	RJ45/Wifi	3G/4G/LTE

Tabuľka 2-6: Špecifikácie a porovnanie LoRa Gateway [24,25,26,27]

licenční partneri. Pri výbere vhodnej Gateway, sa užívateľ musí hlavne zamyslieť nad jej umiestnením (vonkajšie, vnútorne) a prispôbiť jej správnu variantu.

2.9 LoRa v porovnaní s inými sieťami

Pri výbere správnej siete si musí koncový užívateľ správne zadať pre aké účely bude sieť používaná a podľa toho vybrať tú správnu, vhodnú pre jeho aplikáciu. Zároveň pri tom musí brať do úvahy aj obstarávaciu cenu, licenčné poplatky a údržbu jej nasledujúcej prevádzky.

LoRaWAN

Za hlavné výhody tejto siete je možné považovať jednoznačne jej dosah, energetickú nenáročnosť a nulové licenčné poplatky. Užívateľ teda zaplatí vstupnú investíciu a do siete investuje už iba za jej údržbu. Veľkou výhodou je taktiež súčasná prevádzka veľkého množstva zariadení. Bezpečnosť je tiež veľké plus. Ako nevýhody je možné uviesť relatívne vysoké vstupné náklady a obmedzený prenos dát. [9,10]

Bluetooth

Za jednu z najznámejších sietí je možné považovať Bluetooth sieť. Do styku s ňou prišla väčšina používateľov mobilných telefónov. Za hlavné výhody môžeme považovať jednoznačne jej rozšírenosť. Ako takisto významné plus môžeme považovať jej obstarávaciu cenu, rýchlosť a množstvo možných prenesených dát. Pri nevýhodách sa stretávame s vysokou energetickou spotrebou, nízkym dosahom a nutnosťou platiť poplatky pri využívaní aplikácie na komerčné účely. Problém je aj nízka bezpečnosť siete.

SigFox

Táto sieť sa považuje za plnohodnotnú alternatívu k LoRaWAN sieti. Jej architektúra je takisto veľmi podobná tej LoRaWAN. Hlavný rozdiel v týchto sieťach je v ich distribuovaní. Zatiaľ čo LoRaWAN je voľne distribuovaná sieť, SigFox má postavenie operátora a pre jeho možnosť používania musí byť najprv zavedená v danej lokalite. Takisto je potreba platiť licenčný poplatok v hodnote 1€ za zariadenie ročne. Čo sa týka vlastností, LoRa umožňuje rýchlejší prenos dát, zatiaľ čo SigFox ponúka lepšiu citlivosť a menšiu energetickú spotrebu. Táto technológia je populárna hlavne v zámorských štátoch. [28]

GPRS-3G

Mobilné internetové pripojenie môžeme jednoznačne zaradiť medzi najrozšírenejšie. Je ním spoľahlivo pokrytá väčšina územia a pri jeho výbere máme možnosť výberu z viacerých poskytovateľov. Jeho hlavné výhody sú vysoká rýchlosť a spoľahlivosť pripojenia. Ako nevýhody je možné uviesť vysokú energetickú náročnosť a nutnosť platiť celkom vysoké poplatky mobilným operátorom.

3 Ciele praktickej časti práce

Praktická časť bakalárskej práce sa venuje hlavne reálnej aplikácii technológie LoRa. Podľa zadania bolo potrebné navrhnuť a zostrojiť koncové zariadenie komunikujúce v LoRaWAN sieti. Takisto bolo potrebné vybrať vhodné senzory, s ktorými bol koncový modul schopný komunikovať a zaručovali by dostatočnú presnosť merania. Ako poslednú časť bolo potrebné tento modul naprogramovať a zároveň vytvoriť software pre počítať, kde by sa jednotlivé odoslané dáta zobrazovali do prehľadného grafu.

Koncový modul bolo potrebné navrhnuť tak, aby spĺňal náročné technologické požiadavky. Tie sme zhrnuli nasledovne:

- Nízka energetická náročnosť
- Spoľahlivosť
- Jednoduchosť ovládania

Pri tvorbe softvéru pre počítač sa vychádzalo z logických požiadaviek, ktoré by očakával užívateľ od podobného programu. Išlo hlavne o:

- Intuitívne ovládanie
- Priehľadnosť dát
- Malé zaťaženie počítača
- Možnosť jednoduchého prispôsobenia aplikácie pre iné použitie

V rámci bakalárskej práce boli stanovené aj moje vlastné osobné požiadavky, ktoré síce neboli v zadaní, ale podľa môjho názoru by pomohli vytvoriť z praktickej časti plnohodnotný produkt. Pri týchto požiadavkách som sa zameral hlavne na:

- Sprevádzkovanie vlastného Network Serveru
- Navrhnutie Energy harvesting modulu, ktorý by nabíjal baterku zo solárnych článkov
- Vytvorenie obalu, do ktorého by bolo možné umiestniť koncový modul

4 Výber senzorov pre snímanie environmentálnych veličín

4.1 Výber vhodných veličín

Na začiatku výberu si je potrebné ujasniť, aké veličiny by mal výsledný modul snímať. Pri výbere sa bolo treba zamerať na:

- Možnosť implementovania senzoru na DPS
- Nízka energetická náročnosť
- Možnosť použitia senzoru vo veľkej škále teplôt
- Nízka cena

Senzory boli vyberané hlavne z ponuky komerčných veľkoobchodov typu (Farnell, TME, Mouser). Sensory, ktoré spĺňali nami zadané požiadavky, slúžili na meranie:

- Teploty
- Tlaku
- Vlhkosti
- Osvetlenia

4.2 Sensory teploty

Pre meranie sme mali možnosť vyberať z najväčšieho množstva senzorov. Možnosť merania teploty však obsahovali aj iné senzory, ktoré na to neboli primárne dizajnované. Pre snímanie teploty sme mali na výber z nasledujúcich senzorov:

Senzor	DS1624	MCP9800	ADT7301	LM20BIM7
Výrobca	Maxim Intefated	Microchip	Analog Devices	Texas Instruments
Použitie	Meranie teploty	Meranie teploty	Meranie teploty	Meranie teploty
Spôsob komunikácie	I2C	I2C	SPI	Analog
Napájacie napätie	2,7 – 5,5 V	2,7 – 5,5 V	2,7 – 5,25 V	2,4 – 5,5 V
Spotreba Sleep mode	1 – 3 μA	0,1 – 1 μA	0,2 – 1 μA	-
Spotreba Normal mode	125 – 1250 μA	200 – 400 μA	1,6 – 2.2 mA	4,5 – 7 μA
Teplotný rozsah	-55 – 125 [°C]	-55 – 125 [°C]	-40 – 150 [°C]	-55 – 130 [°C]
Rozlíšenie	0,0625 [°C]	0,0625 [°C]	0.03125 [°C]	-
Čas konverzie	max 200 ms	30 – 600 ms	1,2 ms	-
Cena	247 Kč	32 Kč	86 Kč	31 Kč

Tabuľka 4-1: Porovnanie senzorov teploty [29,30,31,32]

Pre testovací modul boli nakoniec zvolené senzory DS1624, MCP9800 a ADT7301. Testovací modul bude bližšie popísaný v kapitole 5.5. Ich voľba bola uskutočnená na základe ich nízkej spotreby a ich variabilnosti v nastaveniach. LM20BIM7 nebol zvolený kvôli jeho vysokej nepresnosti a potrebe čítať hodnotu z ADC prevodníku. Bližšie informácie o senzoch príloha.



Obrázok 4-1: ADT7301 [31]

4.3 Senzory osvetlenia

Pri výbere senzoru osvetlenia som sa zamerlal hlavne na jeho nízku spotrebu a jednoduchosť ovládania. Ponuka senzorov už nebola taká veľká ako pri senzoch teploty, ale aj napriek tomu sa dali nájsť dobré exempláre.

Senzor	BH1750	OPT3001	MAX44009
Výrobca	ROHM	Texas Instruments	Maxim Integrated
Použitie	Meranie osvetlenia	Meranie osvetlenia	Meranie osvetlenia
Spôsob komunikácie	I2C	I2C	I2C
Napájacie napätie	2,4 – 3,6 V	1,6 – 3,6 V	1,7 – 3,6 V
Spotreba Sleep mode	0,01 – 1 μA	0,3 – 0,47 μA	-
Spotreba Normal mode	120 – 190 μA	1,8 – 3,7 μA	0,65 – 1,2 μA
Rozsah výstupu	0,11 – 65535 lux	0 – 83865 lux	0 – 188000 lux
Rozlíšenie	0,5 lux	0,01 lux	0,045 lux
Čas konverzie	16 – 120 ms	100 – 800 ms	100 – 800 ms
Cena	92 Kč	109 Kč	84 Kč

Tabuľka 4-2: Porovnanie senzorov osvetlenia [33,34,35]

Pre testovacie účely boli vybraté senzory BH1750 a OPT3001 kvôli ich lepšej udávanej presnosti a rýchlosti konverzie dát.

4.4 Sensory tlaku

V tejto kategórii nastáva čiastočne problém pri výbere vhodného testovacieho senzoru. Požiadavky nespĺňali najmä v oblasti rozmerov a v energetickej spotrebe. Pri výbere sa dával dôraz aj na dĺžku konverzie.

Senzor	MS5607	MPL3115A2
Výrobca	TE Connectivity	Freescall Semiconductors
Použitie	Meranie tlaku/teploty	Meranie tlaku/teploty
Spôsob komunikácie	I2C/SPI	I2C
Napájacie napätie	1,8 – 3,6 V	1,95 – 3,6 V
Spotreba Sleep mode	0,02 – 0,14 μA	2 μA
Spotreba Normal mode	12,5 μA	2 mA
Hodnoty z výstupu	1 – 120 kPa / –40 – 85 °C	20 – 110 kPa / –40 – 85 °C
Rozlíšenie	0,0024 kPa / 0,0625 °C	0.25 Pa / 0,0625 °C
Čas konverzie	0,5 – 8,22 ms	60 – 1000 ms
Cena	84 Kč	74 Kč

Tabuľka 4-3: Porovnanie senzorov tlaku [36,37]

Nakoľko malý počet vhodných senzorov znemožňoval kvalitné rozhodnutie, bol pre testovacie účely bol použitý iba MS5607 kvôli jeho lepším energetickým vlastnostiam a väčšiemu rozsahu hodnôt.

4.5 Sensory vlhkosti

S najmenšou ponukou vhodných senzorov sa stretávame v tejto kategórii. Sensory nespĺňovali väčšinou požiadavku buď cenovú alebo kvalitatívnu, teda nedokázali zabezpečiť dlhodobé spoľahlivé meranie. Z úzkeho výberu bol nakoniec vybraný senzor SHT75 od Švajčiarskej firmy Sensirion. Tento senzor je známy svojou dobrou odolnosťou a spoľahlivosťou merania.

Senzor je atypický vlastným komunikačným protokolom, ktorý je podobný I2C komunikácií. Rozsah merania vlhkosti je 0 až 100 % RH a okrem toho ako doplnkovú službu ponúka meranie teploty. Odporúčané napájanie je z 3.3 V zdroja a jeho spotreba sa pohybuje na úrovni 1 mA pri meraní a 2 μA v sleep mode do ktorého automaticky po meraní prechádza. Kvalita senzoru sa odzrkadľuje aj na jeho cene a tá je 746 Kč.[38]



Obrázok 4-2: SHT75 [38]

4.6 Vyhodnotenie a testovanie senzorov

Pri vyhodnocovaní senzorov bol kladený najväčší dôraz na senzory teploty, hlavne kvôli jednoduchosti overenia ich správnosti a ich množstvu. Pre overenie kvality

bol uskutočnený test, kde sa porovnávali namerané hodnoty zo senzorov s hodnotou nameranou na WTM module, ktorý mi bol poskytnutý v laboratóriu Mechlab. Testovanie prebehlo v teplotnej komore, v ktorej bol umiestnený skúšobný modul a WTM, v zmysle dosiahnutia čo najobjektívnejších výsledkov. Výsledky boli nakoniec vložené do tabuľky. Napriek tomu, že by sa mohlo zdať, že v tomto prípade by bola priehľadnejší graf, rozdiely nie sú moc markantné, teda vypovedajúca hodnota by bola minimálna kvôli značnej nepriehľadnosti. Hodnoty sú uvedené v [°C]

Č. m	WTM	SHT 75	DS 1624	ADT 7301	MCP 9800	Č. m	WTM	SHT 75	DS 1624	ADT 7391	MCP 9800
1	63,90	65,65	63,44	63,88	64,63	24	24,90	26,20	25,88	26,53	26,50
2	62,30	64,05	62,00	62,38	63,06	25	24,10	24,58	24,31	24,94	24,94
3	60,90	62,53	60,63	61,13	61,94	26	22,90	23,52	22,88	23,41	23,56
4	60,10	62,00	59,75	60,25	61,38	27	21,80	22,79	22,06	22,69	23,00
5	58,90	60,76	58,13	58,72	59,50	28	19,80	20,94	19,94	20,59	21,25
6	56,40	58,62	55,81	56,22	57,69	29	17,80	19,06	17,88	18,47	19,25
7	54,90	57,65	54,31	54,75	56,38	30	16,20	17,44	16,38	16,97	17,69
8	53,40	55,18	52,75	53,16	54,25	31	14,90	16,37	15,00	15,59	16,50
9	51,70	54,52	51,25	51,97	53,25	32	13,40	14,49	13,50	14,06	14,63
10	49,70	51,62	49,25	49,66	50,69	33	12,50	13,62	12,50	13,09	13,81
11	48,00	50,24	47,50	48,00	49,19	34	10,80	12,38	11,00	11,56	12,56
12	46,30	47,83	45,75	46,13	47,00	35	9,70	11,18	9,69	10,41	11,38
13	44,40	46,01	44,19	44,56	45,38	36	8,30	9,96	8,44	8,91	10,13
14	42,40	44,25	42,63	43,06	43,50	37	7,20	8,82	7,25	7,75	9,00
15	40,80	41,87	40,56	41,00	41,44	38	5,10	7,06	5,13	5,47	6,88
16	39,50	41,09	39,50	39,91	40,00	39	4,20	5,77	4,13	4,56	5,69
17	37,90	39,07	37,50	37,97	38,44	40	3,30	5,15	3,38	3,78	5,00
18	35,50	36,52	35,50	36,06	36,38	41	2,10	3,82	2,06	2,53	3,69
19	34,40	34,91	34,25	34,88	34,94	42	0,90	2,73	0,69	1,19	2,50
20	32,50	33,36	32,50	33,06	33,31	43	-0,90	1,04	-0,94	-0,47	0,75
21	31,80	32,67	31,50	32,06	32,44	44	-2,00	0,04	-2,25	-1,78	-0,44
22	29,90	30,51	29,75	30,31	30,44	45	-3,00	-1,12	-3,37	-2,88	-1,69
23	27,80	27,98	27,25	27,78	27,94	46	-3,90	-2,00	-4,12	-3,69	-2,63

Tabuľka 4-4: Výsledok porovnania senzorov

Z tabuľky je zrejme, že najlepšie hodnoty v porovnaní s WTM dosiahol senzor DS1624. Takisto dobré hodnoty sa nám podarilo získať aj zo senzoru ADT7301 a vďaka jeho násobne nižšej cene bol použitý aj vo finálnom zariadení.

Pri výbere senzoru osvetlenia bol vybraný senzor OPT3001. Počas jeho testovania nedošlo k žiadnym zásadným problémom a takisto hodnoty ktoré nameral, v zásade zodpovedali realite. Zakúpené senzory tlaku a vlhkosti boli počas testovania spoľahlivé a preto budú použité aj na finálnom module.

5 Tvorba hardvéru

5.1 Výber MCU

Neodmysliteľnou súčasťou každého inteligentného zariadenia je riadiaca jednotka komunikujúca so všetkými zariadeniami a ovládajúca všetky procesy. Rovnako je to aj v tomto prípade. Od MCU sme očakávali nasledujúce vlastnosti:

- Nízka spotreba v sleep mode
- Možnosť komunikácie po I2C, SPI, UART
- Premapovateľné porty

S ohľadom na nízku spotrebu a predpokladu nenáročnosti procesov vykonávaných týmto MCU bol zvolený 8 bitový MCU od firmy Microchip PIC 18F46J50 [39]. Základné vlastnosti toho to MCU sú:

- XLP (extreme low power) funkcia umožňujúca spotrebu $< 1 \mu A$ počas deep sleep módu
- Dve I2C, SPI a UART periférie. Zároveň podporuje CTMU funkcie na ADC prevodníkoch, čo umožňuje navrhnutie dotykových tlačidiel.
- Celkovo 44 pinov z toho 24 premapovateľných
- 8 MHz interný oscilátor a WDT funkciu

5.2 Výber energy harvesteru

Nakoľko modul bude batériovo napájaný, vyžadoval by si istú údržbu spojenú s jeho nabíjaním. Táto požiadavka môže byť eliminovaná pridaním energy harvesting modulu. Pre najefektívnejšie využívanie solárnej energie od modulu vyžadujeme:

- Možnosť manažmentu batérie
- Možnosť MPPT (Maximum Power Point Tracking) pre dosiahnutie najväčšieho výkonu
- Buck converter pre dosiahnutie ľubovoľného výstupného napätia.

V portfóliu firmy Texas Instruments je viacero takýchto modulov. Sú označené pod názvami BQ25504, BQ25505 a BQ25570. Pre túto aplikáciu splňuje všetky podmienky najlepšie posledný z nich.

BQ25570

Vynikajúce vlastnosti tohto modulu sú veľmi dobre uplatniteľné pre aplikáciu získavania elektrickej energie zo solárnych článkov určenej pre napájanie batérie. Vlastnosti modulu sú: [40]

- Studený štart od 330 mV a následne nepretržitá funkcionálna až do 100 mV
- Nastaviteľné hodnoty prepätia a podpätia na batérii
- Programovateľný Step Down regulátor dosahujúci účinnosť až 93 %

5.3 Výber batérie

Batéria bola vyberaná s ohľadom na veľkosť, kapacitu a jej cenu. Takisto dôležitý bol aj tepelný rozsah, v ktorom je možné batériu prevádzkovať. Zvolená bola Li-Po batéria od firmy CELLEVIA L503448 s nasledujúcim vlastnosťami: [41]

- Nominálne napätie 3,7 V a nominálna kapacita 800 mAh
- Životnosť je uvedená pre 300 nabíjacích cyklov pri zachovaní 80 percent kapacity
- Nízka hmotnosť 16 g a malé rozmery 48.5x34.5x5.5 mm
- Operačné teploty v rozsahu -20 až + 65 °C



Obrázok 5-1: Batéria CELLEVIA L503448

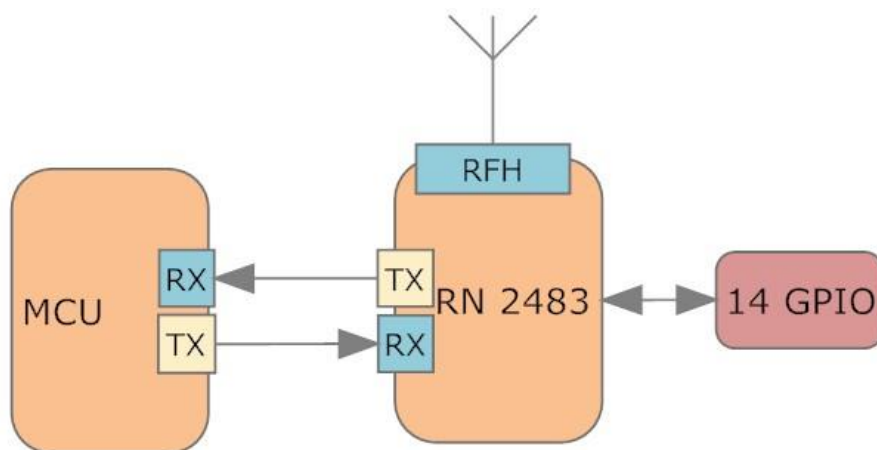
5.4 RN2483 modul

Za najdôležitejšiu časť hardvéru by mohol byť označený Modul RN2483 od firmy Microchip. Toto zariadenie umožňuje plynulú komunikáciu prostredníctvom LoRaWAN siete. Isté špecifikácie tohto modulu už boli spomenuté v rešeršovej časti bakalárskej práce.

Tento modul má vyvinutý vlastný protokol, obsahujúci príkazy pre obsluhu všetkých periférií a zároveň nastavení všetkých potrebných parametrov. Spôsob komunikácie s MCU je vyobrazený na Obrázku 5-3.



Obrázok 5-2: RN2483



Obrázok 5-3: Štruktúra komunikácie medzi MCU a RN2483

Najdôležitejšie príkazy a ich štruktúra je uvedená v Tabuľke 5-1. Ostatné príkazy a ich podrobnejšiu štruktúru je možné nájsť v [42].

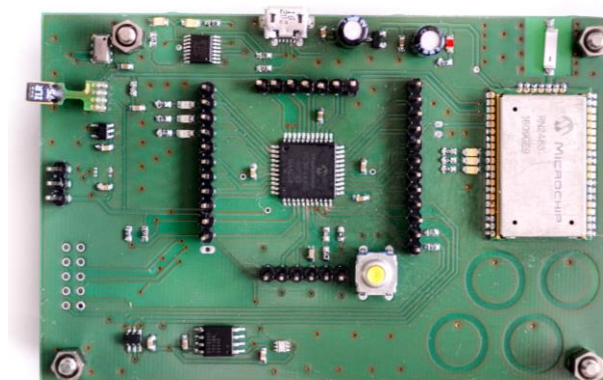
Príkaz	Parametre	Účel
mac join <mode>	<mode> abp/otaa	Spôsob a nadviazanie pripojenia
mac tx <type> <portno> <data>	<type> cnf/uncnf <portno> 1 - 223 <data> Dáta pre odoslanie	Odoslanie správy
mac save	-	Uloženie nastavení
mac set devaddr <address>	<address> 4 bajtová adresa	Nastavenie adresy
mac get dcycleps	-	Získanie hodnoty pre určenie duty

Tabuľka 5-1: Zoznam a popis príkazov pre RN2483 [42]

Dosah modulu bol testovaný aj v reálnych podmienkach. Jeho výsledky je možné nájsť v Prílohe 3. Zároveň bola testovaná aj jeho spotreba pri odosielaní. Testovanie bolo prevádzkované so SF 12 a BW 125 kHz pre získanie maximálneho dosahu. Výsledky spotreby je možné nájsť v Prílohe 5.

5.5 Testovací modul

Pre potreby testovania senzorov a zjednodušenie programovania finálneho modulu bola vyvinutá testovacia doska, na ktorú boli osadené všetky zakúpené senzory, MCU a RN2483. Modul mal vyvedený micro-USB port, ktorý bol prepojený s RS232 prevodníkom, čo umožňovalo komunikáciu prostredníctvom UART protokolu s počítačom, čo výrazne pomohlo pri jeho testovaní a vytváraní knižníc pre senzory.



Obrázok 5-4: Testovací modul

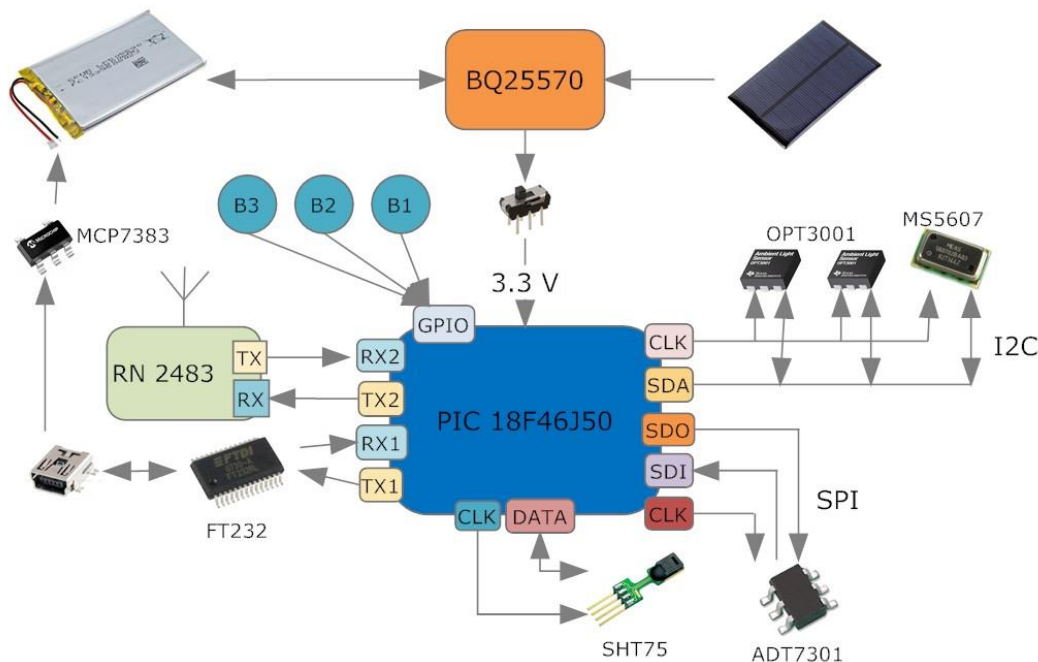
Modul má zároveň väčšinu pinov vyvedených na kolík, teda v budúcnosti ho môžeme použiť na testovacie účely pre ľubovoľné aplikácie.

5.6 Finálny modul

Pred začatím tvorby finálneho modulu je potrebné si ujasniť požiadavky, ktoré by mal spĺňať. Aplikácia pre ktorú je určený, si vyžadovala hlavne:

- Malé rozmery pre možnosť uloženia modulu do kompaktnej krabičky
- Nízkú energetickú spotrebu pre bezúdržbové používanie
- Tlačidlá pre dodatočnú ovládateľnosť modulu
- Ak je to možné, vyhotoviť modul v jednom kuse

Na základe týchto požiadaviek bola navrhnutá bloková schéma finálneho modulu, podľa ktorej sa následne postupovalo pri jeho zostrojení.



Obrázok 5-5: Architektúra finálneho modulu

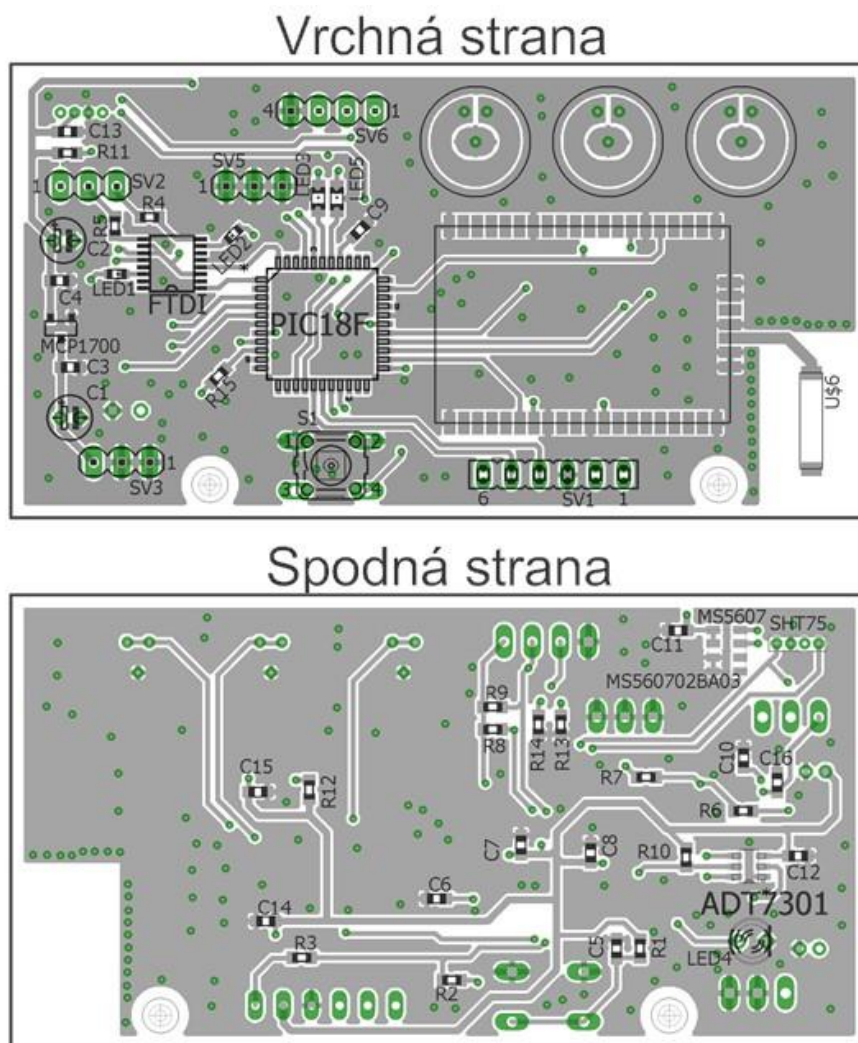
Podľa navrhnutej architektúry sa ďalej postupovalo v dizajnovaní modulu. Celý koncept sa rozdelil do troch častí rozdelených podľa funkcionality.

- Ovládacia doska
- Napájacia doska
- Doska so senzormi intenzity svetla

Ovládacia a napájacia doska budú zložené v jednom kuse a budú prepojené obojstrannými kolíkmi, ktoré zapadajú do dutinkovej lišty. Toto riešenie bolo zvolené kvôli zjednodušeniu rozdielneho napájania jednotlivých súčiastok a za účelom tienenia senzorom. Schémy všetkých dosiek môžeme nájsť v prílohe.

5.6.1 Ovládacia doska

Základom dosky je MCU PIC18F46J50, ktorý slúži ako ovládacia jednotka všetkých periférií a zariadení. Napájanie celej dosky zaisťuje lineárny regulátor MCP1700, umiestnený v ľavej strane dosky. Blokovanie a filtráciu zaisťuje dvojica kondenzátorov na vstupe aj na výstupe regulátora.



Obrázok 5-6: Spodná a vrchná strana ovládacej dosky

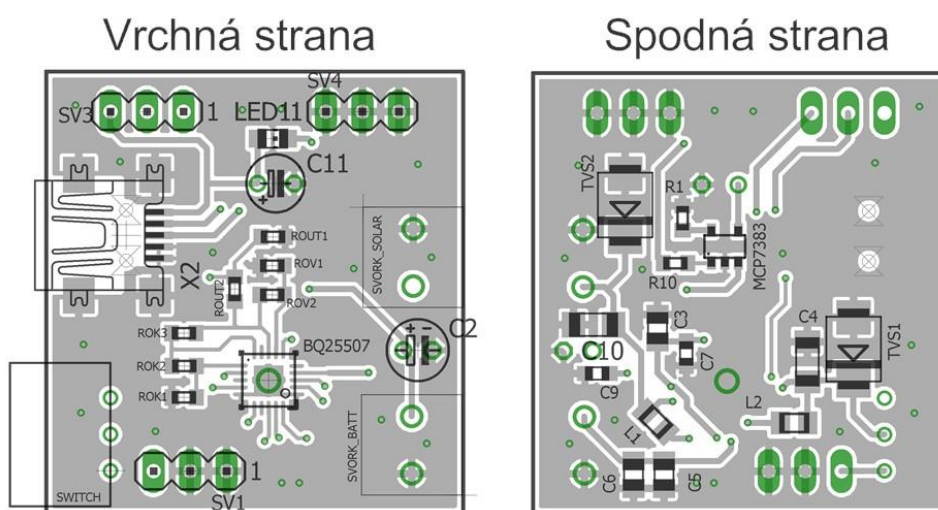
Blokovanie je podstatná časť, nakoľko RN2483 môže v čase odosielania odoberať až 80 mA, čo môže spôsobiť napätový úbytok a reštart zariadenia. RN2483 je prepojený s MCU pomocou dvoch liniek, slúžiacich ako UART-ová komunikácia. Na pravej strane dosky je umiestnená čipová anténa 0868AT43, ktorá slúži ako výstupná anténa z RN2483 modulu. Dôvodom výberu tejto antény bola jej nízka cena, malá veľkosť a podobné vlastnosti s klasickými SMA anténami. Je dôležité, aby bola anténa umiestnená na izolovanej ploche. Na doske sú zároveň tri senzory, umiestnené na ľavej spodnej strane dosky. Toto umiestnenie bolo zvolené vzhľadom na budúce umiestnenie batérie, pre ktorej puzdro už boli vyvrtané dve diery. Každý senzor je blokovaný 100 nF keramickým kondenzátorom, ktorý potláča možné prúdové špičky vznikajúce pri meraní. FT230XS slúži ako rozhranie medzi počítačom a MCU. K FTDI sú pripojené led diódy, ktoré signalizujú prijatie a odoslanie správy. FTDI je napájané priamo pomocou mini-USB portu a tým neohrozuje nízku spotrebu modulu.

Celá doska je doplnená o tri dotykové tlačidlá a led diódy. Led diódy by v budúcnosti mohli slúžiť na prípadnú signalizáciu a tlačidlá na rozšírené ovládanie modulu.

Pri meraní spotreby prvej verzie tohto modulu boli dosiahnuté neočakávané výsledky. Spotreba bola neúmerne vysoká a pohybovala sa na úrovni 1.5 mA v čase spánku. Toto bolo pravdepodobne spôsobené poruchou na RN2483, ktorý musel byť odobratý už z existujúceho zariadenia, nakoľko v čase testovania neboli tieto moduly voľne dostupné na trhu. Tento nedostatok by sa mal s prezentovanou druhou verziou odstrániť a očakávaná spotreba modulu by nemala presiahnuť 100 μ A v čase spánku.

5.6.2 Napájacia doska

Pri navrhovaní napájacej dosky sa kladie dôraz na možnosť nabíjania batérie. Toto umožňuje harvester BQ25570, ktorý je priamo určený pre získavanie energie z nízko energetických zdrojov. K harvesteru je potrebné doplniť ovládacie rezistory. Tieto boli



Obrázok 5-7: Spodná a vrchná strana napájacej dosky

získané z dokumentu [43], ktorý poskytuje firma Texas Instruments a po vložení požadovaných napätí, dokument automaticky vypočíta hodnoty rezistorov.

Na vrchnej strane dosky sú umiestnené dve svorkovnice, na pripojenie solárnych článkov a batérie. Mini-USB port slúži na komunikáciu prostredníctvom rozhrania UART s MCU. Batériu je možné takisto nabíjať pripojením Mini-USB konektora na zdroj napätia prostredníctvom MCP7383, jednoúčelového čipu priamo určeného pre nabíjanie batérie. Voľbou vhodného rezistora bola nastavená hodnota nabíjacieho prúdu na približne 250 mA [44]. Zároveň je k tomuto regulátoru pripojená aj signalizačná dióda, ktorá upozorňuje na nabíjanie zariadenia. Možnosť jednoduchého vypnutia a zapnutia zariadenia umožňuje prepínač. Ako ochrana proti možnému prepätiu z batérie alebo solárnych článkov boli použité TVS diódy.

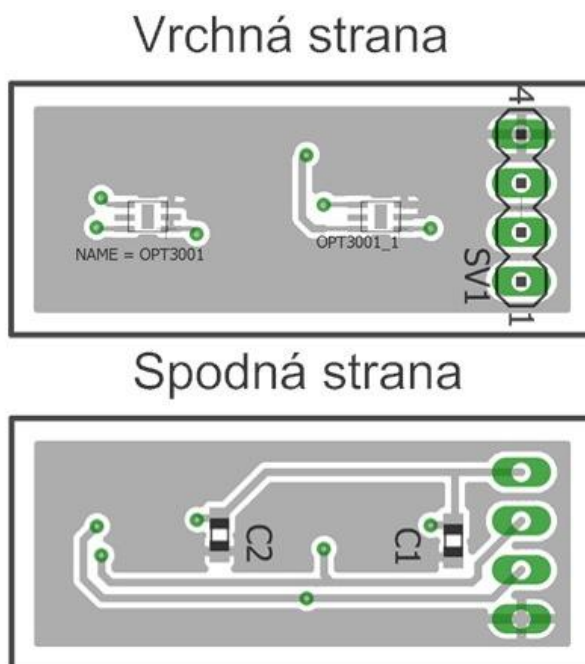
Počas testovania solárnych článkov sa hodnota prúdu z jedného solárneho článku pohybovala okolo hodnoty $I = 20\text{mA}$ pri napätí $U = 3.8\text{V}$. Tieto hodnoty nám dali príkon $P = 76\text{mW}$.

$$P = U \cdot I = 20 \cdot 10^{-3} \cdot 3,8 = 76\text{mW} \quad (3)$$

Pri pripojení štyroch identických solárnych článkov by mohol byť teda dosiahnutý príkon $P = 304\text{mW}$, čo je postačujúce na nabitie batérie. Je potrebné pripomenúť že tieto hodnoty boli namerané počas slnečného dňa za priameho žiarenia.

5.6.3 Doska so senzormi intenzity svetla

Táto najjednoduchšia doska obsahuje iba dva senzory intenzity svetla, ktoré pomocou I2C komunikujú so spodnou doskou a teda MCU. K senzorum bol pripojený iba blokovací kondenzátor zaistujúci spoľahlivý chod senzorov.



Obrázok 5-8: Spodná a vrchná strana dosky so svetelnými senzormi

6 Network Server

Vytvorenie fungujúcej LoRaWAN siete si vyžaduje prítomnosť Network Serveru, ktorý plní hlavnú úlohu v topológii siete. Pri výbere serveru sa mohlo postupovať viacerými spôsobmi.

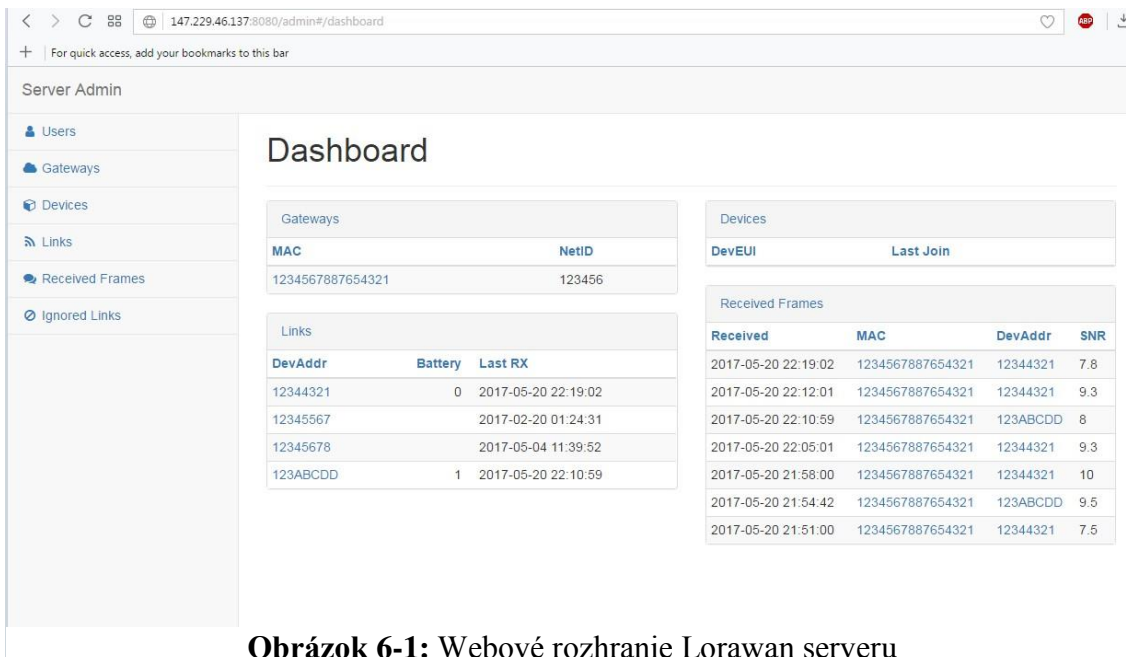
- Zakúpením profesionálnej verzie
- Používaním už existujúcej siete, ktorú poskytujú ČRA
- Použitím freeware bezplatnej verzie

Nakoľko pri zostavovaní mojej práce mi bol v Mechlab-e poskytnutý development kit od firmy Microchip [45], ktorý v sebe obsahoval Gateway, bola by škoda nevyužiť túto možnosť. Development kit okrem iného obsahoval aj Network a Application Server, ktoré avšak nebolo možné považovať za vhodné pre vytváranú aplikáciu.

Profesionálne verzie Network Serveru boli vylúčené z dôvodu ich vysokej ceny aj napriek ich dobrej podpore a kvalite. Ako používaný server bol zvolený “Lorawan-server”, ktorý je distribuovaný prostredníctvom webovej komunity GitHub.

6.1 Lorawan-server

Tento open-source LoRaWAN server je možné získať prostredníctvom webovej komunity GitHub, kde má svoju oficiálnu repository (úschovňu). Momentálne je vyvíjaná verzia 0.4.0. Server je napísaný v programovacom jazyku Erlang, ktorý bol vyvinutý na tvorbu serverov a jeho hlavnou výhodou je vynikajúce zvládanie multivláknových operácií. Webové rozhranie je tvorené v Javascript-e. Server je distribuovaný pod MIT licenciou, teda je možné ho ľubovoľne modifikovať a používať na rôzne účely za podmienok uvedenia autora a znenia licencie.



The screenshot shows the web interface of the Lorawan-server. The browser address bar displays '147.229.46.137:8080/admin#/dashboard'. The interface has a sidebar menu on the left with options: Users, Gateways, Devices, Links, Received Frames, and Ignored Links. The main content area is titled 'Dashboard' and contains four tables:

MAC	NetID
1234567887654321	123456

DevEUI	Last Join
--------	-----------

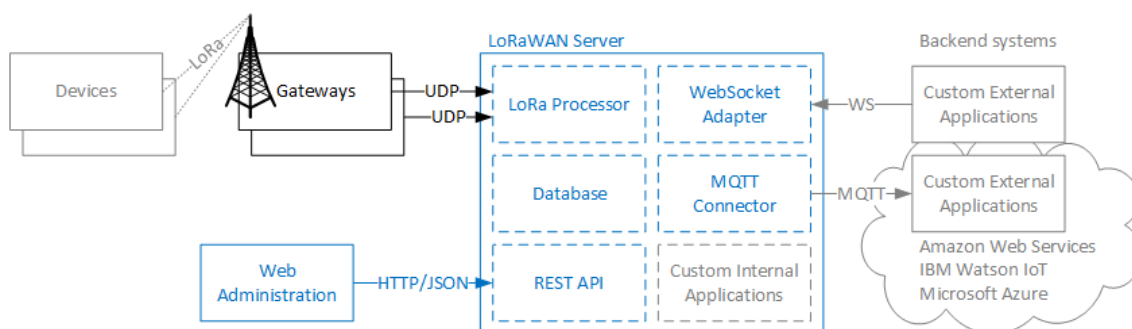
DevAddr	Battery	Last RX
12344321	0	2017-05-20 22:19:02
12345567		2017-02-20 01:24:31
12345678		2017-05-04 11:39:52
123ABCDD	1	2017-05-20 22:10:59

Received	MAC	DevAddr	SNR
2017-05-20 22:19:02	1234567887654321	12344321	7.8
2017-05-20 22:12:01	1234567887654321	12344321	9.3
2017-05-20 22:10:59	1234567887654321	123ABCDD	8
2017-05-20 22:05:01	1234567887654321	12344321	9.3
2017-05-20 21:58:00	1234567887654321	12344321	10
2017-05-20 21:54:42	1234567887654321	123ABCDD	9.5
2017-05-20 21:51:00	1234567887654321	12344321	7.5

Obrázok 6-1: Webové rozhranie Lorawan serveru

Server poskytuje širokú škálu funkcionality, ktorá je potrebná pre plnohodnotné využívanie LoRaWAN siete. Medzi jeho funkcionality patrí:

- Podpora viac Gateway siete a všetkých Gateway fungujúcich na princípe Packet Forwarder (MultiConnect Conduit, LORANK-8)
- Možnosť využívania Class A a Class C zariadení
- Aktiváciu spôsobmi ABP a OTAA a zároveň confirmed správy
- Širokú škálu frekvencií pokrývajúcu väčšinu frekvenčných pásiem
- Komunikáciu s externými aplikáciami za pomoci REST API, MQTT, Websockets



Obrázok 6-2: Architektúra Lorawan serveru [46]

Výborná je takisto kompatibilita s operačnými systémami. Server je teda možné spustiť pod väčšinou známych operačných systémov. Takisto je možné server nahrať na „kontajner“ Docker čo umožňuje jeho bezproblémové presunutie na inú platformu. [46]

6.2 Použitie serveru pre účely bakalárskej práce

Server bol zaobstaraný hlavne pre splnenie úlohy na vybudovanie aplikácie pre zobrazovanie dát. Nakoľko pri vypracovávaní bakalárskej práce mi bola poskytnutá Gateway, zaobstaranie serveru bola logická voľba.

Veľmi výhodné bolo nainštalovať Network Server na školskú sieť, nakoľko škola poskytuje statickú IP a teda po jeho sprevádzkovaní sa bolo možné naň vzdialene pripojiť, čo uľahčilo debugging a testovanie zariadení. Momentálne sa zvažuje umiestnenie antény a Gateway na vrchol budovy A1, čím by bola vytvorená plnohodnotná privátna LoRaWAN sieť.

7 Aplikačný Server

Pre vytvorenie aplikácie použitej na zobrazovanie dát bolo potrebné vytvoriť Aplikačný Server. Pri jeho tvorbe je potreba dbať na jeho spoľahlivosť, nízku záťaž pre výkon počítača a jeho rýchlosť. Zároveň je potrebné aby bol kompatibilný s Network Serverom.

7.1 Vývojové prostredie

Server bol vyvíjaný v prostredí PyCharm od spoločnosti JetBrains. Ako programovací jazyk bol používaný Python 2.7, hlavne kvôli jeho jednoduchej syntaxi a intuitívnemu používaniu. Celý vývoj prebiehal na operačnom systéme Ubuntu 16.04.

Pre vývoj grafického rozhrania bol použitý modul PySide, ktorý interpretuje známy Qt 4.8 framework, populárny hlavne medzi C++ programátormi. Tento modul je distribuovaný pod LGPL licenciou, čo umožňuje jeho použitie pre otvorený aj proprietárny softvér.

Grafy sú vytvárané pomocou modulu matplotlib, distribuovaný pod PSFL licenciou, umožňujúcou používanie modulu pre otvorené aj proprietárne projekty. Modul poskytuje veľké množstvo variácií a možnosti ako vyobraziť namerané dáta. Zároveň je kompatibilný s PySide modulom, čo umožňuje vytvoriť plnohodnotné GUI.

Pri práci boli ešte využívané moduly datetime, numpy, json a pycurl. Používané sú hlavne kvôli zjednodušeniu niektorých zložitých postupov a operácií.

7.2 Spôsob komunikácie s Network Serverom

7.2.1 REST API

Komunikáciu medzi servermi zabezpečujú REST API, implementované v Network Serveri. REST (Representational State Transfer) je súbor pravidiel pre manipuláciu s dátami, založený na http protokole. Pri komunikácii je dôležité uvedomiť si, že REST nemá pevne definovaný protokol. Tento protokol určujú spravidla webové služby, ku ktorým je pomocou REST prístupované. REST definuje spôsoby, ako k týmto dátam môžeme prístupovať. Medzi základné štyri metódy prístupu patria:

- GET – Získanie dát
- POST – Vloženie dát
- PUT – Modifikácia dát
- DELETE – Zmazanie dát

Medzi najpoužívanejšie formáty dát momentálne patria JSON a XML. Obidva sú špecifické a využívajú rozdielne formátovanie správ. Momentálne sa do popredia dostal JSON, hlavne kvôli jednoduchšiemu formátu a získavaniu užitočných dát, nakoľko tento formát je založený na známej syntaxi JavaScriptu.

7.2.2 Využívané REST API

Lorawan server poskytuje všetky štyri základné REST API. Používané sú hlavne pri získavaní dát a editácií zariadení. Formát zápisu je uvedený vo vzorci číslo štyri.

http:// + server +: 8080 / + aplikácia (4)

Nakoľko sa jedná o aplikáciu založenú na http protokole, je dôležité, aby každé volanie začínalo znakom http. Za ním nasleduje IP adresa serveru. Po IP adrese nasleduje číslo portu, po ktorom prebieha komunikácia, v našom prípade je to port 8080, ktorý je bežne využívaný ako administrátorský port. Za touto hlavičkou je potrebné uviesť už iba lomítko s názvom aplikácie, z ktorej chcem dáta čerpať alebo upravovať. V aplikácií boli používané hlavne tieto REST API:

Formát	Metódy prístupu	Popis
/gateways	GET, POST	Zoznam a pridanie gateway
/devices	GET, POST	Zoznam a pridanie devicu
/links	GET, POST	Zoznam a pridanie linku
/links/123	GET, PUT , DELETE	Výpis dát z uvedeného linku a zároveň možná jeho editácia alebo vymazanie
/rxframes	GET	Získanie prijatých dát

Tabuľka 7-1: Zoznam najčastejšie používaných REST API

Všetky tieto príkazy ešte môžeme dodatočne editovať filtermi, ktoré výrazne uľahčujú a zjednodušujú prístup k žiadaným dátam. [46]

Po získaní dát bolo potrebné vyfiltrovať užitočné dáta ktoré boli následné použité. Pre toto slúži mnou vytvorený modul REST_api, ktorý združuje všetky použité volania ktoré využíva aplikácia. Tento modul zároveň umožňuje vkladať, odstraňovať a upravovať jednotlivé zariadenia.

7.3 Funkcionalita serveru

Základnou požiadavkou na funkcionality bolo vykresľovanie dát. Toto bolo ďalej rozšírené o možnosť pridávania, odstraňovania a úpravu jednotlivých zariadení.

Prihlásenie do aplikácie

Pred prihlásením musí užívateľ zadať meno a heslo, ktoré mu umožní prístup do aplikácie. Údaje sú nasledovne posunuté na server, kde sa prostredníctvom REST API overuje, či užívateľ existuje v danej sieti. V prípade jeho existencie, sa užívateľ dostáva do rozšíreného grafického rozhrania. V prípade zadania nesprávnych údajov, alebo nefunkčnosti serveru, je užívateľ upozornený chybovou hláškou.

Popis grafického rozhrania

Po úspešnom prihlásení sa užívateľ dostáva do grafického rozhrania. Na výber má z rôznych možností, ako je napríklad editácia End Node, Gateway alebo vyobrazovanie

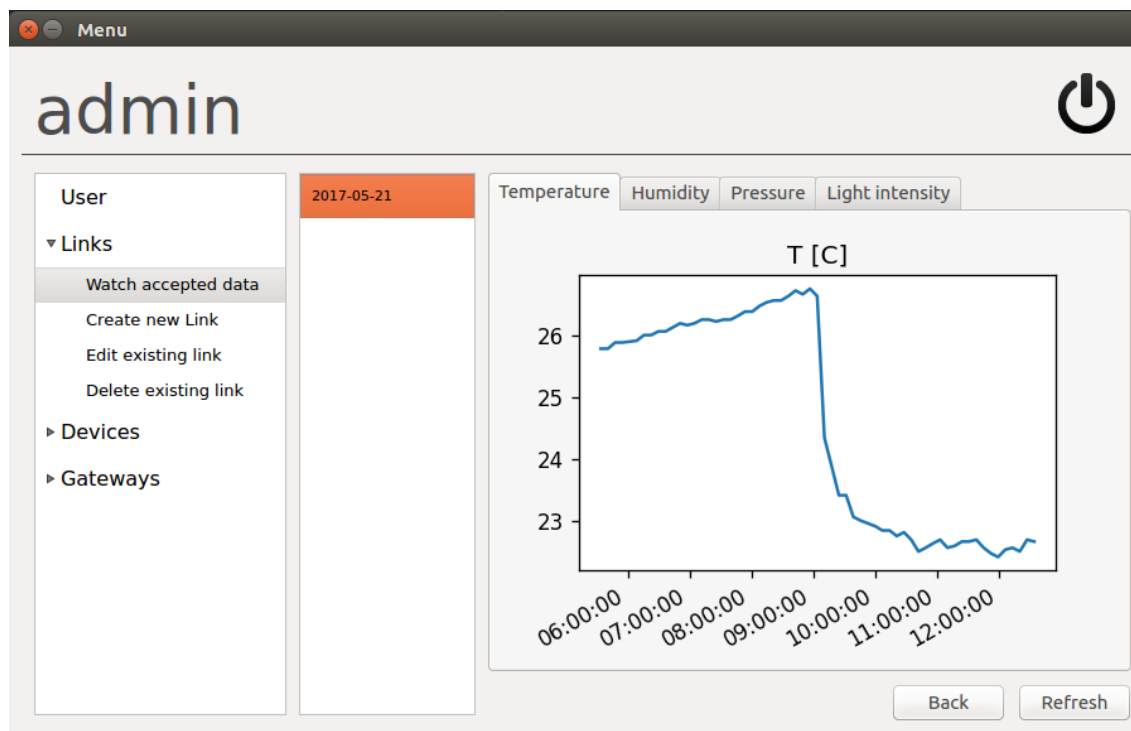
dát. Do budúcnosti je pripravená záložka User, kde by užívateľ mohol vidieť napríklad informácie o počte prijatých správ, zaregistrovaných Linkov atď.

Vyobrazovanie dát

Prijaté dáta sa zobrazujú v záložke Links – Watch accepted data. Po kliknutí na túto záložku má užívateľ možnosť vybrať si jedno zo zariadení, ktoré sú usporiadané pomocou DevAddr. V momente keď je zariadenie vybraté, otvorí sa záložka s dátumami v ktorých server prijal dáta od zariadenia. Tu je už iba potreba vybrať vyžadovaný dátum a nasledovne sú dáta vyobrazené.

Pri zobrazovaní dát máme možnosť vybrať jednu zo snímaných veličín teda teplota, vlhkosť, tlak a osvetlenie. Údaje sú vyobrazené v priehľadnom grafe, kde na osi X je zobrazený čas a osa Y popisuje priebeh danej veličiny.

Vyobrazovanie dát nie je Real Time, nakoľko LoRa nie je stavaná pre tento typ aplikácie, ale po kliknutí na tlačidlo Refresh je graf prepísaný a doplnený o posledné prijaté údaje.



Obrázok 7-1: Okno s vyobrazenými dátami

Zaregistrovanie nového zariadenia

Zariadenie je možné zaregistrovať do siete dvoma spôsobmi a to buď možnosťou „Create new link“ alebo „Create new device“. Metódy sa od seba navzájom líšia spôsobom, akým sa koncové zariadenie identifikuje v sieti. Zatiaľ čo linky sa identifikujú metódou ABP, devices využívajú OTAA. Rozdielnosť identifikácií má za následok aj rozdiel vstupných parametrov.

Pre zobrazenie dát z devices je potrebné zvoliť iný postup. Po úspešnom zaregistrovaní a prihlásení End Node do siete je serverom automaticky vygenerovaná DevAddr pre daný Device. Túto DevAddr je možné nájsť v kolónke Devices – Devices links.

Príklad registrácie je uvedený na obrázku 7-2. Položky označené hviezdikou sú povinné položky, ktoré musí používateľ vyplniť. Ostatné sú dobrovoľné, ale pre lepšiu funkcionality sa takisto odporúčajú uviesť. V prípade nesprávneho formátu vstupných údajov je užívateľ upozornený chybovou hláškou.

The screenshot shows a web application titled 'admin' with a sidebar menu. The 'Links' section is expanded, showing options: 'Watch accepted data', 'Create new Link', 'Edit existing link', and 'Delete existing link'. Below this, there are links for 'Devices' and 'Gateways'. The main content area is a form for creating a new link. It includes fields for 'DevAddr*' (with a placeholder 'Dev Addr'), 'Region' (a dropdown menu showing 'EU 863-870 MHz'), 'Application' (a dropdown menu showing 'websocket'), 'AppID' (with a placeholder 'AppID'), 'NwksKey*' (with a placeholder 'Nwks Key'), 'AppSKey*' (with a placeholder 'Apps Key'), 'Fcmt Check' (a dropdown menu showing 'Strict 16-bit'), 'Set Power' (a dropdown menu showing '20 dBm'), 'Set data rate' (a dropdown menu showing 'SF12 125kHz (250 bit/s)'), and 'Set channel' (a row of 15 checkboxes labeled 1 through 15). A 'Create' button is located at the bottom right of the form.

Obrázok 7-2: Grafické rozhranie pre zaregistrovanie používateľa

Dodatočná funkcionality

Server ďalej umožňuje mazať a editovať zariadenia. Taktiež má plnú funkcionality pre správu Gateway v sieti. Architektúra aplikácie bola vytváraná pre jej jednoduchosť v budúcej úprave a teda ju môžeme aj s malými programovacími znalosťami prispôbiť, čo umožňuje používať túto aplikáciu aj pre iné projekty.

Práca so serverom

Práca so serverom (aplikáciou) si vyžaduje aspoň približnú znalosť siete a kľúčových slov v tejto oblasti. Z toho dôvodu by som aplikáciu neodporúčal používať úplnému začiatočníkovi, ale užívateľovi, ktorý sa s väčšinou týchto pojmov už niekedy stretol.

8 Softvér pre koncový modul

Dôležitú úlohu pri nízkoenergetických zariadeniach zohráva dobre zvládnutý softvér. Požiadavky sú kladené hlavne na možnosť ostať v spánkovom režime pri minimálnej spotrebe energie, z ktorého sa bude v pravidelných intervaloch zobúdzat' a odosielať správy.

8.1 Spôsoby komunikácie

Mikrokontrolér umožňuje komunikovať so zariadeniami pomocou základných periférií. Medzi ne patria UART, SPI a I2C komunikácia. Pri tvorbe softvéru bolo potrebné použiť všetky tieto periférie.

UART

Skratka UART pochádza z „Universal asynchronous receiver/transmitter“ a znamená asynchrónnu komunikáciu medzi dvoma zariadeniami. Komunikácia prebieha po dvoch linkách Tx a Rx. Zbernica zariadení sú k sebe pripojené inverzne. Pred začatím prenosu je potrebné dohodnúť sa na rýchlosti komunikácie „baud rate“ a počte bitov odoslaných v jednej sekvencii, ktorých počet by nemal presiahnuť 8. Komunikácia začína Start bitom, po ktorom je linka stlačená do logickej nuly. Za ňou nasledujú dáta a prenos je ukončený Stop bitom, ktorý vytlačí a ponechá linku v logickej jednotke. [47]

I2C

Komunikácia cez I2C prebieha opäť po dvoch linkách. Od UART sa líši využívaním liniek, nakoľko jedna je používaná ako zdroj časového signálu a druhá ako zdroj dát. Názvy liniek majú väčšinou názov SDA a SCL. Pre komunikáciu je dôležité aby v čase neaktívnosti boli obe komunikácie v logickej jednotke, teda je potreba pripojiť na linky pull-up rezistory. Komunikácia je začatá Start bitom na dátovej linke a za ním nasleduje 7 bitová adresa zariadenia, ktoré má byť oslovené. Posledný 8 bit udáva využitie komunikácie pre zápis alebo čítanie. Pokiaľ je oslovené zariadenie aktívne, odošle Acknowledge (potvrdzujúci bit) tým, že stiahne linku do logickej nuly. Za ňou už prebieha výmena užitočných dát. Komunikácia končí Stop bitom, teda ponechaním dátovej linky v logickej 1. Na dve linky tejto komunikácie je možné pripojiť veľké množstvo zariadení, čo znižuje nároky na počet pinov MCU. [47]

SPI

Tentokrát sa jedná o komunikáciu po troch linkách. Dve linky slúžia na prenášanie dát (MOSI/SIMO a MISO/SOMI) a jedna je určená na prenos hodinového signálu (SCLK). Ku slave zariadeniu je obvykle privedená Chip select linka, ktorou sa určuje, s ktorým zariadením bude prebiehať komunikácia. Výhoda tejto komunikácie spočíva v jej rýchlosti a neobmedzenej veľkosti posielaných správ. Medzi nevýhody môžeme uviesť napríklad žiadnu hardvérovú kontrolu nad overovaním aktívnosti osloveného zariadenia. [47]

Komunikácie použité v zariadení

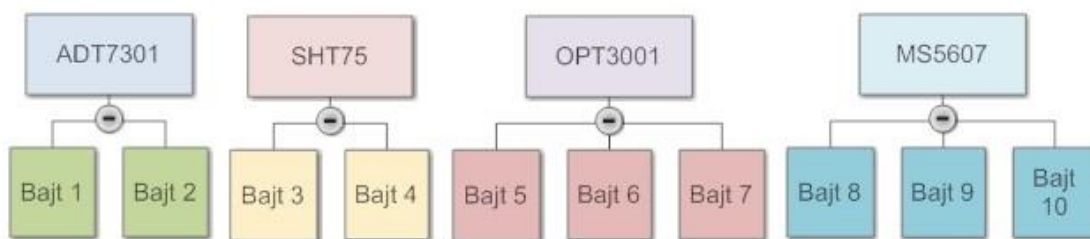
Pri tvorbe softvéru pre MCU boli použité všetky spomenuté metódy komunikácie a zároveň jedna špeciálna, ktorá bola vytvorená hardvérovo a mala podobu I2C komunikácie. Pre jednotlivé zariadenia boli použité nasledujúce typy:

- SPI – ADT7301
- UART – RN2483, FT230X
- I2C – OPT3001, MS5607
- HW protokol – SHT75

8.2 Protokol odosielaných správ

Pre správnu komunikáciu bolo potrebné si dopredu zadať formát správ, ktoré bude koncové zariadenie odosielať takým spôsobom, aby ich vedel aplikačný server dekodovať a zmysluplne vyobraziť.

Dĺžka odosielanej správy bola definovaná na 10 bajtov, pričom každý bajt určuje inú hodnotu. Formát správy má nasledujúcu podobu:



Obrázok 8-1: Formát odosielaných správ

V tomto formáte si bola potreba zároveň určiť, akým spôsobom budeme vkladať hodnoty aby ich spracovanie bolo pre aplikáciu čo najjednoduchšie.

Správa je odosielaná v hexadecimálnom formáte z ktorého je následne potrebné konvertovať správu do desiatkovej sústavy. Dáta zo senzorov sú poväčšine získavané v tvare float, teda s desatinou čiarkou.

Formát pre teplotu

Zo senzoru ADT7301 dostávame hodnotu typu float s presnosťou na 5 desatinných miest. Nakoľko posledné desatinné miesta nemajú žiadnu výpovednú hodnotu, budeme brať výsledok merania iba do hodnoty stotín. K hodnote z merania pripočítame číslo 50, ktoré reprezentuje spodný limit merania senzoru, teda vyhneme sa tomu, aby boli odosielané záporné hodnoty. Následne vynásobíme výsledok 10^2 a zaokrúhlime. Výslednú hodnotu prevedieme do hexadecimálneho tvaru. Spätý postup uplatníme nasledovne na Aplikačnom Serveri pre získanie hodnoty.

Príklad pre teplotu 26,13874:

$$x = \text{round}((t + 50).100) = \text{round}((26,13874 + 50).100) = 7613 \quad (5)$$

$$\text{data} = \text{hex}(x) = \text{hex}(7613) = 0x1DBD \quad (6)$$

Formát pre vlhkosť

Vlhkosť je braná podobne ako teplota s presnosťou na dve desatinné miesta, s výnimkou pripočítania hodnoty, nakoľko vlhkosť je udávaná v rozmedzí 1 – 100 % a teda nemôže dosiahnuť zápornú hodnotu.

Formát pre osvetlenie

Pre osvetlenie je potrebné použiť až 3 bajty nakoľko hodnota osvetlenia meraná senzorom OPT3001 môže presiahnuť 65535, ktorá presahuje rozsah unsigned integeru. Hodnotu už nenásobíme, iba zaokrúhlime a prevedieme do hexadecimálneho tvaru.

Formát pre tlak

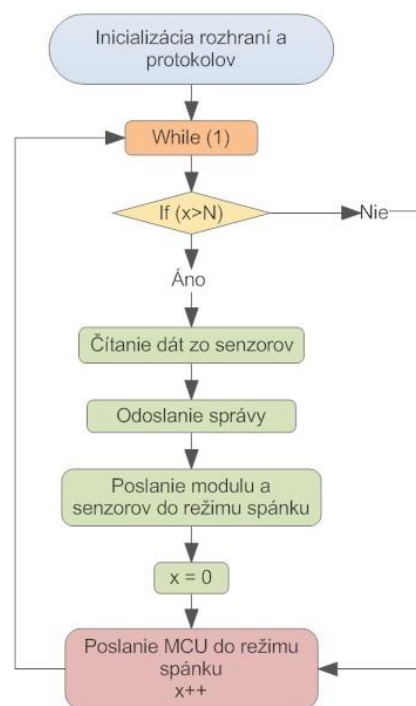
Pri tlaku dostávame zo senzoru MS5607 celé hodnoty, ktoré už nie je potreba inak upravovať preto ich iba prevedieme do hexadecimálneho formátu.

8.3 Kód pre MCU

Nakoľko kód pre MCU je celkom obsiahly, v práci budú uvedené iba dôležité výstrižky z kódu. Zvyšok je možné nájsť v prílohe.

Bloková schéma

Štruktúra programu je popísaná na porozumenie jednoduchšou blokovou schémou. Na začiatku celého programu je potrebné inicializovať poistky a makrá. Zároveň je potrebné správne nakonfigurovať registre určené pre komunikačné protokoly. Po správnej konfigurácii sa program dostáva do nekonečného while cyklu. Podmienka $x > N$ priamo určuje periódu odosielaných správ. V prípade, že je podmienka naplnená, nasleduje vyčítanie dát zo senzorov, spracovanie a nasledovné odoslanie. V momente ukončenia odosielania sú všetky senzory a RN modul uspaté, pričom premenná x je vynulovaná. Nasleduje uspatie MCU a inkrementácia premennej x . V prípade neplatnosti prvej podmienky nasleduje prechod MCU do spánku a takisto inkrementácia premennej x . Je potrebné podotknúť že konštantu N musíme zdefinovať pred nahratím programu na MCU.



Obrázok 8-2: Bloková schéma programu

Ukážky z kódu

```
#include <xc.h>
#include "UART_commands.h"
#include "SPI_commands.h"
#include "Sensors_lib.h"
#include "I2Ccommands.h"
#include "Sleep_commands.h"
#include "RN_commands.h"
#include "SHT75.h"
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <math.h>
```

Touto časťou zabezpečuje vloženie všetkých potrebných knižníc. Knižnice uvedené v úvodzovkách je možné nájsť v prílohe. Knižnice obsahujú funkcie pre obsluhu každého zariadenia/senzoru na module.

```
#pragma config WDTEN = ON      // Watchdog Timer (Enabled)
#pragma config WDTPS = 32768   // Watchdog Postscaler (1:32768)
```

WDT je používaný ako možnosť zobudiť MCU zo sleep modu. Po uvedení do spánku ostane aktívny jedine interný oscilátor a o jeho obsluhu sa stará rozhranie WDT. V rámci jeho nastavení ide nastaviť postdeličku, na ktorej závisí dĺžka intervalu spánku MCU.

```
#define N_OF_REPEATS 2 //Setting the transmission period
```

V nastavovaní tohto makra vieme približne vypočítať periódu jedného odosielania. Jej dĺžka sa dá pri nezmenenej postdeličke WDT vypočítať ako:

$$t \doteq (N_OF_REPEATS + 1) \cdot 140 \text{ (s)} \quad (7)$$

Znamienko približne značí že táto perióda sa môže meniť s okolitou teplotou, nakoľko od nej je závislá odchýlka rýchlosti interného oscilátora.

```
sprintf(message, "mac tx uncnf 2 %.4x%.4x%.6x%.6x", Temperaturex, Humidityx,
                                                         Light_intensityx, Pressurex[1]);
                                                         //Prepare message for sending
RN_SendCommand(message); //Send message
```

Nasledujúca ukážka má za úlohu vytvoriť správny koncept správy, ktorá je následne pomocou príkazu `sprintf` vložená do poľa znakov `message`. Zároveň hodnoty zo senzorov prevedieme do hexadecimálnej hodnoty správnej dĺžky. Celá táto správa je následne pomocou príkaz `RN_SendCommand(message)` posunutá RN modulu, ktorý správu odošle.

```
RN_SendCommand("sys sleep 2000000"); // Putting RN module in sleep mode
repeat = 0;                          //Clearing the repeat counter
```

Nasledujúca časť pošle do sleep módu RN modul na dĺžku 2000 sekúnd. Toto je robené za účelom dosiahnutia optimálnej spotreby. Dĺžka spánku RN modulu by mala

byť dlhšia ako perióda jedného odosielacieho cyklu. Následne je vynulovaná repeat premenná. Je dôležité poznamenať že tieto príkazy sa vykonávajú iba pri odosielaní.

```
Sleep_Funct(); // Putting MCU in to sleep mode  
repeat++;      // Increment the repeat counter
```

Nasledujúce príkazy sa vykonávajú na konci každého cyklu. MCU je vložené do sleep modu a po jeho prebudení je inkrementovaný counter.

Vývojové prostredie

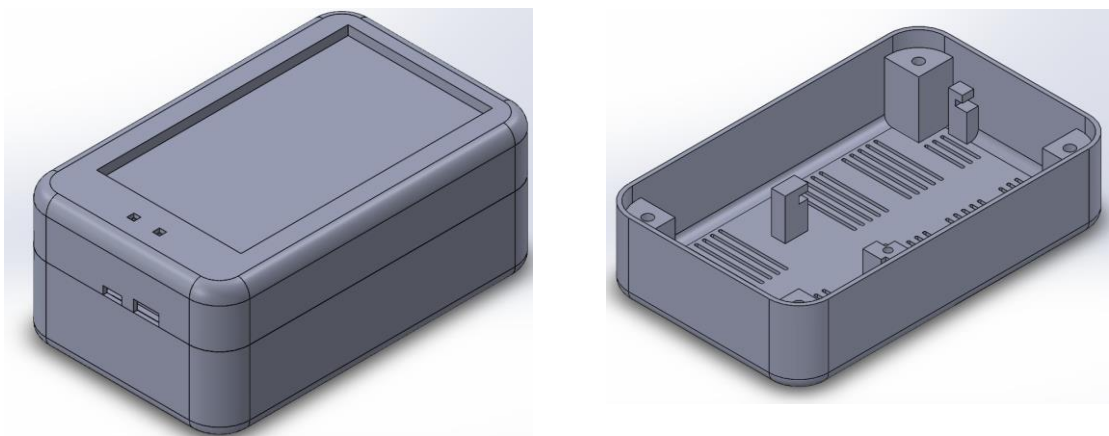
Softvér bol vyvíjaný vo vývojovom prostredí MPLAB IDE v3.45, ktorý je určený pre programovanie MCU. Program bol napísaný v programovacom jazyku C za podpory štandardných knižníc. Pri programovaní boli predovšetkým používané knižnice, ktoré boli vytvorené pre testovací modul.

9 Finálny produkt

9.1 Obal

K dokončeniu celého produktu bolo potrebné ešte vymyslieť obal, s ktorým by bolo možné používať modul aj v aplikáciách ktoré by so sebou prinášali riziko nepriaznivejších klimatických podmienok. Zároveň by to zvýšilo atraktivitu a dizajn produktu ako celku.

Návrh prebiehal v programe Solidworks a bol vytváraný so ohľadom na rozmery hardvérovej časti modulu a solárnych článkov slúžiacich pre jeho napájanie.



Obrázok 9-1: Návrh krabičky

Krabička má dva otvory, jeden pre min-USB port a druhý pre spínač. Na jej vrchnej časti budú umiestnené solárne články. Dve dierky na vrchu slúžia k uloženiu svetelných senzorov. Krabička je zložená z dvoch častí, ktoré sú k sebe prichytené skrutkami. Zároveň poskytuje miesto pre uloženie modulu. V spodnej časti je navrhnutá mriežka, ktorá slúži najmä na vetranie.

V čase písania tejto práce krabička ešte nebola vyrobená ale bude vytlačená na 3D tlačiarňi, ktorú poskytuje Mechlab svojim študentom.

10 Záver

Výsledkom bakalárskej práce je kompletný produkt, ktorý umožňuje odosielanie a pôsobenie v LoRaWAN sieti. Produkt pozostáva z troch častí:

- LoRa modul umožňujúci odosielanie a meranie dát
- Aplikačný Server pre zobrazovanie dát
- Network Server pre správu týchto zariadení

Časová náročnosť tejto práce bola celkom veľká, čo ešte násobil fakt mojich slabých predchádzajúcich znalostí v problematike návrhu hardvéru a poznatkoch v oblasti sietí. Vývoj bol naopak urýchlený mojimi predchádzajúcimi znalosťami z objektového programovania, čo mi pomohlo hlavne pri tvorbe Aplikačného Serveru aj napriek tomu, že takúto komplexnú aplikáciu som programoval prvý krát. Zároveň veľké plus bola aj predchádzajúca znalosť v oblasti programovania MCU.

Vďaka správne časovému rozloženiu práce, sa mi podarilo prácu dokončiť včas a bez väčších komplikácií. S využitím mechatronického prístupu, som sa dokázal lepšie zamyslieť nad výrobkom ako celkom, čo takisto urýchlilo čas pri jeho vývoji.

Na začiatku práce som sa snažil získať teoretické vedomosti o fungovaní a vlastnostiach siete. Následne som sa pokúsil vytvoriť vlastný Network Server, kde som zjavne precenil svoje schopnosti a po týždni som siahol radšej po hotovom riešení. Pre tento server som následne vytvoril Aplikačný Server a nakoniec som vytváral hardvér. Pri opätovnom spracovaní bakalárskej práce, by som začal so skoršou tvorbou hardvéru, nakoľko tento vývoj mi zabral najviac času a uskutočnil som pri jeho vývoji množstvo chýb.

Vývoj prebiehal za odbornej pomoci doktorantov pôsobiacich v Mechlab, ktorý mi odovzdali obrovské množstvo praktických poznatkov a skúsenosti, ktoré by som svojpomocne získal len veľmi ťažko.

Celý produkt je veľmi univerzálny a môže veľmi dobre poslúžiť ako odrazový mostík pre vývoj inej aplikácie. Trochu ma avšak mrzí maximálny rozsah bakalárskej práce, čo mi znemožnilo lepšie sa venovať popisu a fungovaniu siete.

11 Zdroje

- [1] ZÁHLAVA, V. Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [2] MIŠUREC, J., ZEMAN, V., ŠTĚPÁN, M. Konstrukce elektronických zařízení - návrh plošných spojů. Brno: 2003.
- [3] LORA Alliance, [online], Dostupné z: <https://www.lora-alliance.org/>
- [4] Učebnice jazyka C 1.díl, Herout Pavel, Vydavatelství Kopp, ISBN/EAN 978-80-7232-383-8/9788072323838, 270 stran A5
- [5] Logo LoRa [PNG], Gorilla Distribution, [cit. 24.5.2017],
Dostupné z: <https://www.gorilladistribution.com.au/2015/06/05/lora-technology/>
- [6] LoRaWAN architecture,[PNG], SURF Innovation Blog, [cit. 24.5.2017],
Dostupné z: <https://blog.surf.nl/en/lora-the-internet-of-things/>
- [7] Internet of things [online], WIKIPEDIA The Free Encyclopedia, [cit. 24.5.2017],
Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things
- [8] LoRa Architecture [online], 3GLTEinfo, [cit 24.5.2017], Dostupné z:
<https://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology>
- [9] Adelanto a kol., 2017, Understanding the Limits of LoRaWAN, [PDF], Cornell University Library, [cit. 24.5.2017], Dostupné z:
<https://arxiv.org/pdf/1607.08011.pdf>
- [10] Somin a kol., LoRa Specification, [PDF], LoRa Alliance, [cit 24.5.2017],
Dostupné z: <https://www.lora-alliance.org/portals/0/specs/LoRaWAN%20Specification%201R0.pdf> ,2015
- [11] Designer's Guide, [PDF], Semtech, [cit. 24.5.2017], Dostupné z:
https://www.semtech.com/images/datasheet/LoraDesignGuide_STD.pdf , 2013
- [12] ETSI EN 300 220-1, [PDF], ETSI, [cit. 24.5.2017], Dostupné z:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022001/02.04.01_40/en_30022001v020401o.pdf ,2012
- [13] LoRa Calculator, [software],Dostupné z: <http://www.semtech.com/wireless-rf/rf-transceivers/sx1276/>
- [14] České Radikomunikace, [online], Dostupné z: <https://www.cra.cz>
- [15] Mapa pokrytia, [PNG], Chip CZ, [cit. 24.5.2017], Dostupné z:
<http://www.chip.cz/novinky/trendy/ceske-radiokomunikace-rozsiruji-pokryti-site-lora-pro-internet-veci/>
- [16] The Things Network, [online], Dostupné z: <https://www.thethingsnetwork.org>
- [17] LORIoT. [online], Dostupné z: <https://www.loriot.io>

- [18] Simfony, [online], Dostupné z: <http://simfonymobile.com>
- [19] RestIO, [online], Dostupné z: <http://www.iot-partners.com>
- [20] EMB-LR1272 datasheet, [PDF], Dostupné z: http://www.embit.eu/wp-content/datasheets/EMB-LR1272-datasheet_rev1.0.pdf
- [21] Miromico FMLR – Technical Details, [online], Dostupné z: <http://www.miromico.ch/radio-module-technical-details.html>
- [22] RN2483 datasheet, [PDF], Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002346A.pdf>
- [23] iM881A-M datasheet, [PDF], Dostupné z: https://wireless-solutions.de/images/stories/downloads/Radio%20Modules/iM881A/General_Information/iM881A_Datasheet_V1_0.pdf
- [24] Wirnet Station 868 datasheet, [PDF], Dostupné z: <http://www.trinstruments.cz/data/files/datasheet-wirnet-station-868.pdf>
- [25] MultiConnect Conduit datasheet, [PDF], Dostupné z: <http://www.multitech.com/documents/publications/data-sheets/86002170.pdf>
- [26] Lorrier, [online], Dostupné z: <https://lorrier.myshopify.com/products/lorrier-lr2-iot-lora-gateway-868mhz>
- [27] RHF2S008 Technical Details, [online], Dostupné z: <http://www.risinghf.com/product/rhf2s008-loralorawan-industrial-gateway-434mhz-470mhz-868mhz-951mhz/?lang=en>
- [28] Sigfox, [online], WIKIPEDIA The Free Encyclopedia, [cit. 24.5.2017], Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sigfox>
- [29] DS1624 datasheet, [PDF], Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/2000943.pdf?_ga=2.151220473.1379546980.1495651574-526791489.1484690725
- [30] MCP9800 datasheet, [PDF], Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/1315357.pdf?_ga=2.240991687.511719481.1495651705-526791489.1484690725
- [31] ADT7301 datasheet, [PDF], Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/2258678.pdf?_ga=2.87535320.1746708113.1495651786-526791489.1484690725
- [32] LM20 datasheet, [PDF], Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm20.pdf>
- [33] BH1750 datasheet, [PDF], Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/1813320.pdf?_ga=2.209989142.226534647.1495651936-526791489.1484690725
- [34] OPT3001 datasheet, [PDF], Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opt3001.pdf>

- [35] MAX44008 datasheet, [PDF], Dostupné z:
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX44009.pdf>
- [36] MS5607 datasheet, [PDF], Dostupné z:
http://www.farnell.com/datasheets/1917237.pdf?_ga=2.60755949.1128008461.1495652538-526791489.1484690725
- [37] MPL3115A2 datasheet, [PDF], Dostupné z:
http://www.farnell.com/datasheets/1971355.pdf?_ga=2.214068951.1303165313.1495652664-526791489.1484690725
- [38] SHT75 datasheet, [PDF], Dostupné z:
http://www.farnell.com/datasheets/1563784.pdf?_ga=2.197823851.53838706.1495652811-526791489.1484690725
- [39] PIC 18f46J50, [online], Dostupné z:
<http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC18F46J50>
- [40] BQ25570 datasheet [PDF], Dostupné z:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25570.pdf>
- [41] LP503448 datasheet, [PDF], Dostupné z:
http://www.tme.eu/gb/Document/5409b9cc0696257c9ab8ad23cdaa0af7/lp503448_800mah_pcm_2.54mmkonektor.pdf
- [42] LoRa Mote User's Guide, [PDF], Microchip, Dostupné z:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/LoRa%20Mote%20Users%20Guide.pdf>
- [43] bq25505/70 Design Help V1.3, [excel], Dostupné z:
<http://www.ti.com/product/BQ25570/toolssoftware>
- [44] MCP7383 datasheet, [PDF], Dostupné z:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001984g.pdf>
- [45] LoRa Technology Evaluation Kit, [online], Microchip, Dostupné z:
<http://www.microchip.com/DevelopmentTools/ProductDetails.aspx?PartNO=dv164140-1>
- [46] Lorawan-server, [online], GitHub, Dostupné z:
<https://github.com/gotthardp/lorawan-server>
- [47] Common Microcontroller Communication Protocols, [online], Union College Dostupné z:
<http://www.engineering.union.edu/~hodgsond/MER421/Winter%202015/Lectures/MER421Serial.pdf>, 2015
- [48] Frequency-shift keying [online], WIKIPEDIA The Free Encyclopedia, [cit. 24.5.2017], Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency-shift_keying

Zoznam skratiek

ADC – Analog-to-digital converter
ADR – Adaptive Data Rate
API – Application Programming Interface
AppEUI – Application Identifier
AppKey – Application Key
AppSKey – Application Session Key
BW – Bandwidth
CTMU – Charge Time Measurement Unit
ČRA – České Radiokomunikace
DevAddr – End-Device Address
DevEUI – End-Device Identifier
DPS – Doska plošných spojov
DR – Data Rate
FSK – Frequency-Shift Keying
GUI – Graphical User Interface
I2C – Inter-Integrated Circuit
IoT – Internet of Things
LoRa – Long Range
LoRaWAN – Low Power Wide Area Network
MCU – Microcontroller Unit
MPPT – Maximum Power Point Tracking
MQTT – Message Queue Telemetry Transport
npreamble – Programovateľný počet znakov preambuly
NwkSKey – Network Session Key
payloadSymbNb – Počet znakov prenosu
REST – Representational State Transfer
SF – Spreading Factor
SNR – Signal-to-Noise ratio
SPI – Serial Peripheral Interface
TCP/IP – Transmission Control Protocol / Internet Protocol
Tpacket – Čas prenosu
 T_{sym} – Znak trvania
TVS – Transient-Voltage-Suppression
UART – Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB – Universal Serial Bus
WDT – WatchDog Timer
XLP – Extreme Low Power

Zoznam obrázkov

Obr. 2-1: Logo technológie LoRa [5]	12
Obrázok 2-2: Architektúra LoRaWAN siete [6].....	13
Obrázok 2-3: Predpokladaný rozsah pokrytia pre polovicu roku 2017 [15]	18
Obrázok 4-1: ADT7301 [31]	24
Obrázok 4-2: SHT75 [38]	25
Obrázok 5-1: Batéria CELLEVIA L503448.....	28
Obrázok 5-2: RN2483.....	28
Obrázok 5-3: Štruktúra komunikácie medzi MCU a RN2483	29
Obrázok 5-4: Testovací modul	30
Obrázok 5-5: Architektúra finálneho modulu.....	30
Obrázok 5-6: Spodná a vrchná strana ovládacej dosky	31
Obrázok 5-7: Spodná a vrchná strana napájacej dosky	32
Obrázok 5-8: Spodná a vrchná strana dosky so svetelnými senzormi.....	33
Obrázok 6-1: Webové rozhranie Lorawan serveru	34
Obrázok 6-2: Architektúra LoRaWAN serveru [46]	35
Obrázok 7-1: Okno s vyobrazenými dátami	38
Obrázok 7-2: Grafické rozhranie pre zaregistrovanie používateľa.....	39
Obrázok 8-1: Formát odosielaných správ	41
Obrázok 8-2: Bloková schéma programu	42
Obrázok 9-1: Návrh krabičky	45

Zoznam tabuliek

Tabuľka 2-1: Frekvenčné pásma [11]	14
Tabuľka 2-2: Špecifické nastavenia pre komunikáciu [10]	15
Tabuľka 2-3: Závislosť SNR a citlivosti na SF [10]	15
Tabuľka 2-4: Maximálna dĺžka správ [10].....	16
Tabuľka 2-5: Špecifikácie a porovnanie LoRa modulov [20,21,22,23].....	20
Tabuľka 2-6: Špecifikácie a porovnanie LoRa Gateway [24,25,26,27].....	20
Tabuľka 4-1: Porovnanie senzorov teploty [29,30,31,32]	23
Tabuľka 4-2: Porovnanie senzorov osvetlenia [33,34,35]	24
Tabuľka 4-3: Porovnanie senzorov tlaku [36,37]	25
Tabuľka 4-4: Výsledok porovnania senzorov	26
Tabuľka 5-1: Zoznam a popis príkazov pre RN2483 [42]	29
Tabuľka 7-1: Zoznam najčastejšie používaných REST API.....	37

Zoznam príloh

Príloha 1: Kompletný kód pre MCU.....	1
Príloha 2: Fotka finálneho modulu	3
Príloha 3: Testovanie dosahu a úspešnosť odoslania správ	4
Príloha 4: Testovanie P2P komunikácie	4
Príloha 5: Spotreba RN2483 pri odosielaní	5
Príloha 6: Fotka úvodnej obrazovky Aplikačného Servera	5
Príloha 7: Schéma zapojenia spodnej dosky.....	6
Príloha 8: Schéma zapojenia napájacej dosky	7
Príloha 9: Schéma zapojenia dosky so svetelnými senzormi	7
Príloha 10: Vrchná a spodná strana testovacej dosky.....	8
Príloha 11: V-A charakteristika zaťažovania solárnych článkov	9

Prílohy na CD

Na priloženom CD je možné nájsť:

- Elektronickú verziu bakalárskej práce vo formáte PDF
- Elektronickú verziu príloh vo formáte PDF
- Softvér pre MCU
- Zdrojový kód pre Aplikačný Server
- Inštalácia pre Network Server
- Schému zapojenia Testovacej dosky
- Schému zapojenia Finálneho modulu
- Solidworks model krabičky

